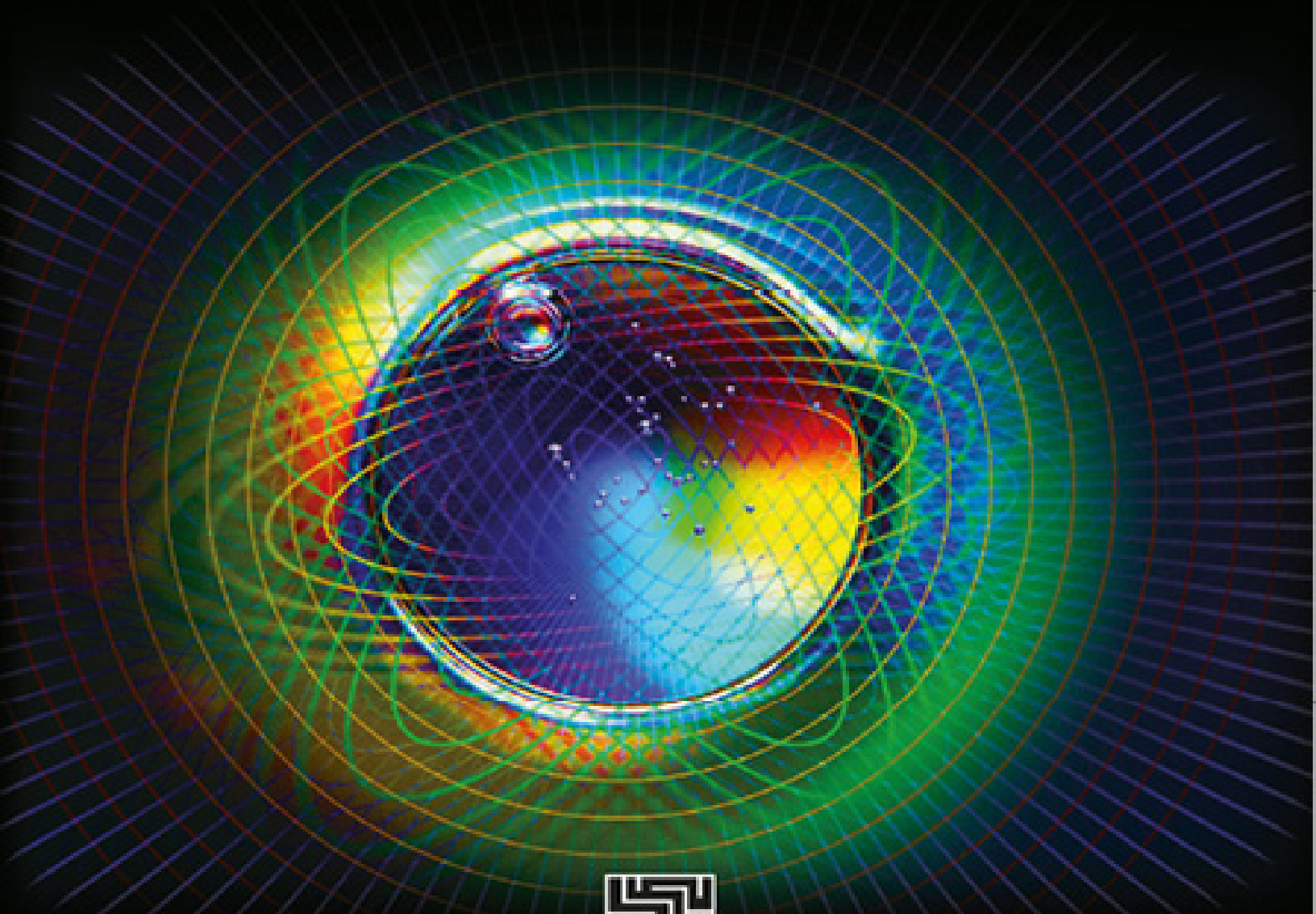
Jim Baggott

KWANTOWA RZECZYWISTOŚĆ

W POSZUKIWANIU PRAWDZIWEGO ZNACZENIA MECHANIKI KWANTOWEJ



NA ŚCIEŻKACH NAUKI

Prószyński i S-ka

JIM BAGGOTT

KWANTOWA RZECZYWISTOŚĆ

Przełożyli
Urszula i Mariusz Seweryńscy

Prószyński i S-ka

Tytuł oryginału
QUANTUM REALITY

Copyright © 2020 by Jim Baggott
All rights reserved

Quantum Reality was originally published in English in 2020.
This translation is published by arrangement
with Oxford University Press.
Prószyński Media is solely responsible for this translation
from the original work and Oxford University Press
shall have no liability for any errors,
omissions or inaccuracies or ambiguities
in such translation or for any losses caused
by reliance thereon.

Projekt okładki
Magdalena Palej

Ilustracje na okładce
© azazello photo studio/Shutterstock.com

Redaktor serii
Adrian Markowski

Redakcja
Anna Kaniewska

Korekta
Małgorzata Denys

ISBN 978-83-8234-738-8

Warszawa 2021

Wydawca
Prószyński Media Sp. z o.o.
02-697 Warszawa, ul. Rzymowskiego 28
www.proszynski.pl

Dla Iana Millsa,
który tak wiele nauczył mnie
o mechanice kwantowej

PRZEDMOWA

Wiem, dlaczego tu jesteście.

Zdajecie sobie sprawę, że mechanika kwantowa jest teorią naukową święcącą niezwykłe triumfy, na której w ogromnej mierze bazuje nasz styl życia osnutego wokół nowoczesnych technologii, od smartfonów po sygnał satelitarny. Macie też świadomość, że jest to teoria całkowicie szalona. Wraz z nią gwałtownie otwarto okno, przez które prąd powietrza zmian bezceremonialnie wywiał wszystkie wygodne poglądy na temat fizycznej rzeczywistości, jakie w swojej naiwności wysnuliśmy z interpretacji zasad dynamiki Isaaca Newtona. Choć mechanika kwantowa niezaprzeczalnie *działa*, to jednak zdaje się, że nakazuje nam uganiać się za duchami i zjawami, widzieć cząstki, które są falami, i fale, które są cząstkami, koty, które jednocześnie są żywe i martwe, zmagać się z mnóstwem dziwacznych na pierwszy rzut oka zjawisk, czym doprowadza nas do stanu, w którym desperacko chcemy już tylko położyć się w ciemnym pokoju i zaznać wytchnienia.

Jedną chwileczkę. Jeśli bylibyśmy skłonni zdobyć się na nieco więcej precyzji w objaśnianiu, co mamy na myśli, gdy mówimy o „rzeczywistości", przy jednoczesnym zachowaniu większej wstrzemięźliwości w odniesieniu do możliwości *odzwierciedlania* rzeczywistości przez jakąkolwiek teorię naukową, wówczas *wszelka tajemniczość prysłaby* niczym bańka mydlana.

Nie żartuję. Mam reputację faceta z gatunku tych, których na imprezach można spotkać w kuchni, psujących zabawę zimnym sceptycyzmem i wyrachowaną racjonalnością przekłuwających

baloniki ekscytujących tajemnic i miejskich legend (Amerykanie czasami kwitują takie sprawy okrzykiem „woo”). Nie pasuję do Kirka (lub McCoya), raczej do Spocka. Ostatnio ktoś określił mnie jako osobę „depresyjnie trzeźwą”[1]. Taką etykietkę mogę nosić z niekłamaną dumą. W księgarniach można znaleźć wiele książek popularnonaukowych poruszających temat dziwactw i „woo” mechaniki kwantowej. Ta jednak do nich nie należy.

I z całą pewnością nie dziwactwa i nie „woo” sprawiły, że jesteście tu ze mną.

Uczciwość nakazuje jednak stwierdzić, że książka, która mówi: „serio, nie ma tu żadnej tajemnicy”, byłaby odrobinę nudna i nieciekawa (bez względu na to, jak dobrze napisana), ale byłaby też całkowicie nieprawdziwa. Z pewnością możemy pozbyć się najdrobniejszych śladów tajemniczości z mechaniki kwantowej, jednak ceną jest porzucenie wszelkiej nadziei na pogłębienie naszego rozumienia natury. Musielibyśmy się zadowolić prostym wykorzystywaniem teorii kwantowej w roli narzędzia do wykonywania obliczeń i formułowania przewidywań, opierając się pokusie zadania pytania: *Ale jak natura to robi?* I w tym sęk: czyż teorie naukowe nie powstają po to, aby wzbogacać nasze rozumienie fizycznego świata?

Nie miejmy złudzeń. *Wybór, przed którym stoimy, ma charakter filozoficzny*. Z naukowego punktu widzenia absolutnie nie ma nic złego w depresyjnie trzeźwej interpretacji mechaniki kwantowej, w której nie ma żadnej tajemnicy. Jeżeli zdecydowalibyśmy się jednak pociągnąć za którąkolwiek z luźnych nitek, bylibyśmy zobowiązani brać mechanikę kwantową za pewnik i interpretować jej pojęcia bardziej dosłownie. I uwaga, co za niespodzianka! Pociągnięcie nitek doprowadziłoby do rozprucia tkaniny i ujawnienia wszystkich tych zjawisk w świecie kwantowym, które tak wytrącają nas z równowagi – znaleźlibyśmy się znowu w punkcie wyjścia.

Nie piszę tej książki, aby psuć czytelnikom zabawę (mam nadzieję), ale by podjąć próbę wyjaśnienia, co w mechanice kwantowej zmusza nas do zmierzenia się z wyborem takiego rodzaju i dlaczego jest to wybór całkowicie filozoficzny w swej naturze. Podejmowanie różnych wyborów prowadzi do różnych interpretacji lub nawet modyfikacji

opisu kwantowego i jego pojęć, składając się na coś, co nazywam (z wyrazami szacunku dla George'a R.R. Martina) *grą o teorię*.

Część pierwszą zaczyna krótkie podsumowanie wszystkiego, co należałoby wiedzieć o mechanice kwantowej; mam nadzieję, że będzie ono dobrą podstawą do dalszej lektury. Następnie opowiem o zasadach gry, opartych na pragmatycznym, lecz całkowicie rozsądnym rozumieniu pojęcia „rzeczywistości" oraz na pewnych wnioskach, do których mamy nadzieję dojść w wyniku naukowego jej opisu. Pierwszą część zamyka wielki spór Alberta Einsteina z Nielsem Bohrem, rozgrywający się w drugiej połowie lat dwudziestych i na początku lat trzydziestych XX wieku, na tle którego doszło do wyłonienia się antyrealistycznej interpretacji kopenhaskiej. To pięknie zbuduje nam scenę.

Następnie, w drugiej części, przejdziemy do omówienia różnych prób rozgrywania gry, począwszy od dziedzictwa kopenhaskiego przez relacyjną mechanikę kwantową do interpretacji opartych na kwantowej „informacji". Przyjrzymy się próbom ponownego zdefiniowania kwantowego prawdopodobieństwa, opierającym się na nowych sformułowaniach aksjomatów mechaniki kwantowej, wprowadzeniu pojęcia spójnych historii i bayesianizmie kwantowym. Zaraz potem skierujemy naszą uwagę na interpretacje realistyczne, oparte na myśli, iż mechanika kwantowa jest teorią statystyczną. Znajdują się wśród nich teorie zmiennych ukrytych w odmianach lokalnych (nierówności Bella) albo „kryptonielokalnych" (nierówności Leggetta).

Zebrane na przestrzeni ostatnich czterdziestu lat dowody eksperymentalne dość mocno przemawiają przeciw lokalnym i kryptonielokalnym zmiennym ukrytym. Wobec tego zwrócono się ku interpretacjom opartym na nielokalnych zmiennych ukrytych (takich jak teorie określane mianem „fali pilotującej") lub próbowano rozwiązać problemy wynikające z „kolapsu funkcji falowej" przez wprowadzenie nowych mechanizmów fizycznych, uwzględniających nawet możliwy udział ludzkiej świadomości. W toku tych działań wysnuto wniosek, iż funkcja falowa jest rzeczywista, ale nie ulega kolapsowi, dzięki czemu dochodzi do rozgałęziania jej na wiele światów i tworzenia wieloświata.

Pozwolę sobie na pewien kaprys. Otóż w całej książce będę odwoływał się do niewątpliwie wymyślnej analogii lub metafory[2]. Opiera się ona na pomyśle, zgodnie z którym gra o teorie obejmuje nawigowanie „Statkiem Nauki" po niebezpiecznych wodach „Morza Odwzorowania". No dobrze, przyznaję, za dużo naczytałem się powieści fantasy.

Będziemy pływać tym statkiem tam i z powrotem pomiędzy dwoma brzegami. Jeden z nich to zwodniczo przyjazne, łagodne, piaszczyste plaże Rzeczywistości Metafizycznej. Drugi tworzą skaliste, poszarpane i często niegościnne klify Rzeczywistości Empirycznej. Ten pierwszy ukształtowany jest przez nasze abstrakcyjne wyobrażenia, nieskrępowaną kreatywność, osobiste przekonania i uprzedzenia, a także przez najróżniejsze, czasami bardzo prozaiczne zjawiska, które jesteśmy zmuszeni przyjąć bez dowodu, aby w ogóle można było cokolwiek zdziałać w domenie nauki. Przekładają się one na jedną lub więcej *metafizycznych prekoncepcji*, podsumowujących to, co myślimy na temat fizycznej rzeczywistości, a nawet co składa się na naszą wiarę w to, jaka powinna być fizyczna rzeczywistość. Przekonania te, co wynika z ich natury, nie mają poparcia w dowodach empirycznych. Jeśli więc tak jest wygodniej, można o tych prekoncepcjach myśleć jako o przejawach intuicji lub nawet dogmatach wiary, co pobrzmiewa w jednym z moich ulubionych cytatów z Einsteina: „Na opisanie tej ufności w racjonalny charakter rzeczywistości i możliwość jej poznania – do pewnego stopnia – przez ludzki umysł nie znajduję lepszego określenia niż »religijna«"[3].

Na mapach naszego morza widnieją dwa śmiertelnie groźne miejsca. W pobliżu brzegów Rzeczywistości Empirycznej znajduje się skalista mielizna Scylli. To jałowy instrumentalizm, z punktu widzenia prac doświadczalnych perfekcyjnie poprawny, lecz pozbawiony jakiegokolwiek realnego znaczenia w odniesieniu do świata fizycznego i jego rozumienia. Charybda czyha bliżej plaż Rzeczywistości Metafizycznej. To potężny wir rozszalałego, nieokiełznanego metafizycznego nonsensu. Wyzwanie, przed którym stoją teoretycy, polega na znalezieniu bezpiecznego szlaku przez Morze Odwzorowania. W *Kwantowej rzeczywistości* chcę pokazać,

dlaczego zadanie to okazało się tak piekielnie trudne i dlaczego w kontekście ewentualnego sukcesu nie opuszczają mnie bardzo złe przeczucia.

Witajcie więc. Jesteście tu, bo chcecie dostać jakieś odpowiedzi. Usiądźcie i czujcie się jak u siebie, ja tymczasem nastawię wodę w czajniku.

1 Zrobiła to Sabine Hossenfelder, fizyk teoretyk, komentując w tweecie datowanym na 11 marca 2018 roku moją książkę *Pożegnanie z rzeczywistością*.

2 Rozwijam tę metaforę już od jakiegoś czasu. Pojawia się ona w krótkim wykładzie, który wygłosiłem w czerwcu 2017 roku (zob. https://www.youtube.com/watch?v=VGR68Zl1k8w&), a także w mojej książce *Przestrzeń kwantowa. Pętlowa grawitacja kwantowa i poszukiwanie struktury przestrzeni, czasu i Wszechświata*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2020, oraz artykule: Jim Baggott, *The Impossibly Stubborn Question at the Heart of Quantum Mechanics*, „Prospect", 2 sierpnia 2018, https://www.prospectmagazine.co.uk/science-and-technology/the-impossibly-stubborn-question-at-the-heart-ofquantum-mechanics (dostęp 15.12.2020).

3 Cyt. za: Maurice Solovine, *Albert Einstein: Lettres à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, Paryż 195. Cytat pojawił się później w: Arthur Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, wyd. 2, University of Chicago Press, Chicago 1986, s. 110.

PROLOG

Dlaczego nikt nie powiedział mi o tym wcześniej?

Z mechaniką kwantową po raz pierwszy zetknąłem się na pierwszym semestrze studiów licencjackich na kierunku chemii, dość ponurą i deszczową jesienią 1975 roku w angielskim Manchesterze.

Gdy cofam się pamięcią do tamtego czasu, wcale nie dziwi mnie, że wszyscy studenci z mojego rocznika (włącznie ze mną) byli kompletnie zbici z tropu tym, czego ich nauczano. Do tamtej chwili wszyscy żyliśmy w błogiej nieświadomości, iż poza mechaniką newtonowską, przypominającą mechanizm zegara za sprawą swej gładkiej ciągłości i bezlitosnej pewności, jest coś więcej do nauczenia się o świecie fizycznym.

Nasze rozumienie atomów ograniczało się do „modelu planetarnego", kojarzonego z nazwiskami takich fizyków jak Niels Bohr i Ernest Rutherford. Gdybyśmy się nad tym wszystkim zastanowili (a mogę zdradzić wam, że tego nie zrobiliśmy), moglibyśmy wpaść na pomysł, że klasyczne teorie, które stosowaliśmy do opisu planet krążących wokół Słońca, powinno się po prostu rozszerzyć na opis małych kulek materii obdarzonej ładunkiem elektrycznym, okrążających leżące w centrum atomu jądro. Owszem, działały tu inne siły, ale z pewnością wyniki byłyby identyczne.

Tymczasem powiedziano nam, że fizyką atomów i cząsteczek rządzi inny komplet praw, który muszą poznać nawet chemicy. W ogóle nie byliśmy na to przygotowani. Już na pierwszym wykładzie przedzieraliśmy się przez gęstą dżunglę, jaką tworzyły odkrycie kwantu przez Maxa Plancka, hipoteza „kwantów światła" Einsteina,

kwantowa teoria atomu Bohra, dualizm korpuskularno-falowy de Broglie'a[4], mechanika falowa Schrödingera i zasada nieoznaczoności Heisenberga.

Miałem wrażenie, że głowa mi od tego wybuchnie.

Mechanika jest działem fizyki, który koncentruje się na opisie, jak i dlaczego coś się *porusza*, za pomocą jednego lub wielu matematycznych *równań ruchu*. Z perspektywy czasu wydaje się, że nasze kłopoty potęgował fakt, iż ewolucja ówczesnego rozumienia mechaniki klasycznej zatrzymała się na szkolnych podręcznikach w wersji zaproponowanej przez Newtona. Nie studiowaliśmy fizyki, nasze wykształcenie więc nie obejmowało skomplikowanych przeróbek mechaniki klasycznej, wprowadzonych najpierw w XVIII wieku przez Josepha Louisa Lagrange'a i później w wieku XIX przez Williama Rowana Hamiltona. Prace te nie były zwykłym przeformułowaniem praw Newtona w kontekście innych wielkości fizycznych (na przykład energia zamiast siły mechanicznej Newtona). W szczególności Hamilton w dużym stopniu dopracował i pogłębił klasyczną strukturę, a jego dzieło, nazywane *mechaniką Hamiltona*, rozszerzyło zakres stosowalności teorii na wiele nowych warunków.

Wobec tego musieliśmy się zmierzyć nie tylko z tym niezwykłym zjawiskiem nazywanym *funkcją falową*, lecz także z wyzwaniem, jakim było zapisanie czegoś nazywanego „hamiltonianem" dla wybranego układu fizycznego lub sytuacji, jak choćby dla orbity elektronu w atomie albo drgań wiązania chemicznego utrzymującego atomy w cząsteczce, chociaż tak naprawdę nie mieliśmy pojęcia, skąd się to wszystko bierze[5].

Jednakże, powiedzmy to jasno, sprawy te całkowicie mnie pochłonęły. Zapełniłem moje zeszyty równaniami, które wyglądały... cóż, wyglądały *pięknie*. Nadal nie miałem pojęcia, co wszystko to znaczy, ale nauczyłem się, jak najskuteczniej korzystać z dobrodziejstw mechaniki kwantowej i odłożyć na bok wątpliwości. Dokończyłem studia magisterskie na Uniwersytecie Oksfordzkim, a kilka lat później doktorskie w Oksfordzie i na Uniwersytecie Stanforda w Kalifornii, aby wrócić do Anglii i objąć stanowisko wykładowcy na wydziale chemii na uniwersytecie w Reading. Mimo że nigdy nie byłem szczególnie biegły w matematyce, w dziedzinie

mechaniki kwantowej bardzo dużo nauczyłem się od Iana Millsa, profesora spektroskopii chemicznej na moim wydziale. Powodów do dumy przysporzyła mi publikacja kilku artykułów omawiających teorię kwantową wysokoenergetycznych drgań cząsteczkowych.

Potem, w 1987 roku, gdy od kilku miesięcy prowadziłem gościnnie badania na Uniwersytecie Wisconsin-Madison, natrafiłem na artykuł, który kompletnie zamieszał mi w głowie. Autorem był N. David Mermin[6], a publikacja dotyczyła czegoś, co określano mianem „eksperymentu myślowego" Einsteina–Podolskiego–Rosena, znanego już od 1935 roku, oraz pewnych doświadczeń laboratoryjnych Alaina Aspecta i współpracowników z 1982 roku, których celem było badanie natury rzeczywistości kwantowej.

Byłem zażenowany. Wpadłem na to cokolwiek późno. *Dlaczego nikt nie powiedział mi o tym wcześniej?*

Pozwoliłem moim (skromnym) umiejętnościom *posługiwania się* mechaniką kwantową, aby zwiodły mnie na manowce myślenia, że naprawdę ją rozumiem. Artykuł Mermina jaskrawo pokazał, że wcale tak nie jest. Tak zaczęła się moja trzydziestoletnia osobista wyprawa badawcza. Jestem teraz dumnym posiadaczem kilku półek uginających się od książek na temat mechaniki kwantowej, historii nauki i filozofii, a mój laptop zapełniają sprowadzone z sieci artykuły. Sam napisałem kilka własnych książek, z których pierwsza ukazała się w 1992 roku.

Mogę z radością zakomunikować, jak zrobił to charyzmatyczny fizyk Richard Feynman, że wciąż nie rozumiem mechaniki kwantowej[7]. Sądzę jednak, że teraz rozumiem, *dlaczego* tak jest.

4 Ponad czterdzieści lat później wciąż słyszę wykładowcę, jak na marginesie głównego wywodu zwraca uwagę na wymowę nazwiska: „de broj”.

5 Napisałem specjalistyczną książkę, adresowaną głównie do czytelników mających wykształcenie obejmujące fizykę i pewne umiejętności matematyczne, zatytułowaną *The Quantum Cookbook: Mathematical Recipes for the Foundations of Quantum Mechanics.* Została ona opublikowana w 2020 roku przez Oxford University Press i postrzegam ją jako dopełnienie tej właśnie, którą czytacie. Kiedy miałem 18 lat, taka książka byłaby bardzo pomocna.

6 N. David Mermin, *A Bolt from the Blue: The E-P-R Paradox*, w: A.P. French i P.J. Kennedy (red.), *Niels Bohr: A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge, MA 1985, s. 141–147.

7 W książce *Charakter praw fizycznych* (przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 137) Richard Feynman napisał słynne słowa: „sądzę, że mogę bezpiecznie stwierdzić, iż nikt nie rozumie mechaniki kwantowej”.

CZĘŚĆ PIERWSZA

REGUŁY GRY

ROZDZIAŁ 1

Kompletny przewodnik po mechanice kwantowej

(w okrojonej wersji)

Wszystko, co zawsze chcieliście wiedzieć, oraz kilka detali gratis

Oto czego nauczyłem się przez jakieś ostatnie czterdzieści lat.

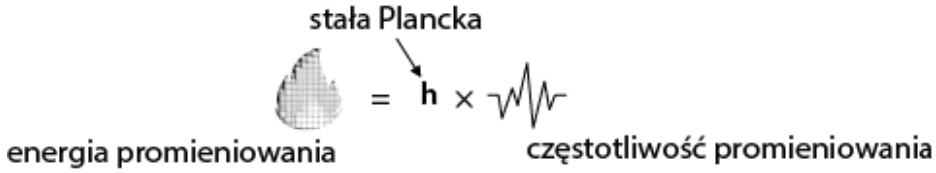
Natura nie jest gładka i ciągła, ale ziarnista

Wiemy obecnie, że materia zbudowana jest z atomów. Z kolei każdy atom zbudowany jest z lekkich, obdarzonych ujemnym ładunkiem elektrycznym elektronów, „krążących" wokół ciężkich, obdarzonych dodatnim ładunkiem elektrycznym protonów (tworzonych przez dwa kwarki górne i jeden kwark dolny) i elektrycznie obojętnych neutronów (tworzonych przez jeden kwark górny i dwa kwarki dolne)[8]. Atomy mają budowę dyskretną. Możemy powiedzieć, że są „zlokalizowane". Atomy znajdują się „tu" lub „tam". Nie ma w tym stwierdzeniu nic odkrywczego.

Jednak wbrew teoriom kilku filozofów ze starożytnej Grecji, głoszonym dwa i pół tysiąca lat temu, pod koniec XIX wieku temat atomów wciąż wzbudzał spore kontrowersje. Jak wierzyć w istnienie owych cząstek, jeśli nie ma nadziei na to, że kiedykolwiek zdobędzie się przemawiające za nimi dowody?

W istocie to właśnie chęć udowodnienia, że atomy nie istnieją, podsunęła Maxowi Planckowi myśl o badaniu własności i zachowania tak zwanego ciała doskonale czarnego, promieniowania uwięzionego we wnętrzu cylindrycznych pojemników z platyny i porcelany[9]. Kiedy taki pojemnik jest podgrzewany, jego wnętrze zaczyna świecić niczym palenisko. Wraz ze wzrostem temperatury zmienia się barwa wypromieniowywanego światła, z początku blask jest czerwony, później pomarańczowy, żółty, jasnożółty, by ostatecznie przejść w jaskrawą biel. Planck był zainteresowany znalezieniem teorii, która opisywałaby zmiany wzorca i natężenia różnych częstotliwości (albo długości fal, ewentualnie barw) promieniowania wraz ze wzrostem temperatury.

To, co w „akcie desperacji" odkrył Planck w 1900 roku, zmieniło go w zdeklarowanego atomistę, ale potrzeba było jeszcze kilku lat, by autentyczna głębia znaczenia tego odkrycia przeniknęła do świadomości naukowców. Planck doszedł do wniosku, że promieniowanie we wnęce jest pochłaniane i emitowane przez ściany pojemnika w taki sposób, jakby składało się z oddzielnych porcji, które nazwał *kwantami*. Wniosek ten znalazł odbicie w równaniu, które znamy obecnie pod nazwą równania Plancka–Einsteina:



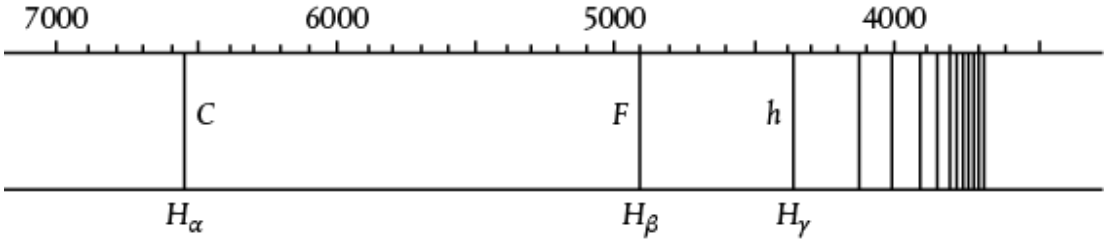
Może nie robi to oszałamiającego wrażenia, ale zastanówmy się. Częstotliwość promieniowania jest wielkością ciągłą i zmieniającą się w sposób płynny – nie ma nagłych przeskoków lub wyrw w widmie zapełnionym tęczowymi barwami: wydaje się, że kolory zlewają się ze sobą. Gdyby energia była równa częstotliwości promieniowania, wynikałoby z tego, że energia również musi być wielkością ciągłą i zmieniającą się w sposób płynny. Nie to jednak znalazł Planck. Dla każdej danej częstotliwości promieniowania stała Plancka (oznaczana literą *h*) odpowiada najmniejszej ilości energii, jaka może być pochłaniana lub emitowana przez ciało fizyczne. Energia nie jest pobierana lub oddawana przez ciało w sposób ciągły i płynnie, ale

raczej w porcjach określanych przez *h*. Stała Plancka jest charakterystycznym znakiem wszystkiego, co kwantowe.

Początkowo Planck wiązał to zachowanie z atomową naturą substancji tworzącej ściany pojemnika. Dopiero Einstein naprawdę zapoczątkował kwantową rewolucję, gdy w 1905 roku sformułował cokolwiek oburzający postulat, iż *samo promieniowanie* jest „skwantowane” w zlokalizowanych, dyskretnych porcjach lub grudkach energii. Tak brzmi hipoteza „kwantów światła” Einsteina, dzięki której w nazwie powyższego wzoru występują dziś nazwiska obu naukowców, Plancka i Einsteina. Oczywiście, hipoteza była poprawna. Obecnie te grudki światła i energii nazywamy *fotonami*.

Zatem nie tylko materia występuje w porcjach, ale promieniowanie też. Kiedy elektron w atomie uzyskuje coraz więcej i więcej energii, „okrąża” jądro w coraz większej i większej średniej odległości, aż ostatecznie zostaje całkowicie od atomu oderwany. Nie można jednak tej energii dostarczać płynnie i w sposób ciągły. Elektron pochłonie energię tylko w wyraźnie odrębnych porcjach, co przyczynia się do powstania *widma atomowego* (zob. rysunek 1).

Widmo atomowe wygląda trochę jak drabinka ze szczeblami układającymi się w charakterystyczny wzór. To Niels Bohr pierwszy odkrył w 1913 roku, że wzór ten jest opisywany przez jedną lub więcej *liczb kwantowych* oraz że w przeciwieństwie do prawdziwej drabiny szczeble kwantowe układają się coraz bliżej siebie, im wyższe są wartości energii. Jeśli dostarczy się elektronowi wystarczającą ilość energii, konieczną do wspięcia się na kolejny szczebel, to można odnieść wrażenie, że orbita elektronu natychmiast się zmienia, w sposób *nieciągły*, co określa się mianem „skoku kwantowego”.



Rysunek 1. Ilustracja ukazuje szereg linii w widmie atomowym wodoru, którego atom składa się z pojedynczego protonu w centrum i krążącego wokół niego elektronu. Energia rośnie od strony lewej do prawej, a widmo pokazuje, że nie jest pochłaniana lub emitowana w sposób ciągły, lecz w odrębnych porcjach. Widmo to pojawia się w podręczniku *Lærebog i Physik* z 1910 roku, autorstwa Christiana Christiansena, od którego Niels Bohr pobierał nauki na Uniwersytecie Kopenhaskim. Długości fali są oznaczone na górnej podziałce i wyrażone w angstremach (jedna dziesiąta nanometra albo jedna dziesięciomiliardowa metra), wyraźnie zakreślono charakterystyczne linie widmowe H_α (czerwoną o długości 656,3 nanometra), H_β (niebieską o długości 486,1 nanometra) i H_γ (fioletową o długości 434,0 nanometra).

O ile nam wiadomo, w naturze nie ma niczego, co nie byłoby skwantowane. Zapewne skwantowane są również przestrzeń i czas.

Fale są cząstkami i cząstki są falami

Muszę przyznać, że francuski fizyk Louis de Broglie jest w moich oczach bohaterem. Zdaje się, że po zdobyciu Nagrody Nobla w 1929 roku jego wpływ na świat nauki był niewielki, ale to, czego dokonał sześć lat wcześniej, z nawiązką wystarczyło, aby odcisnąć trwałe piętno w historii ludzkości.

Hipoteza kwantów światła Einsteina była przyjmowana w tamtym czasie z dużą dozą sceptycyzmu. Kiedy w 1913 roku zgłoszono jego kandydaturę do prestiżowej Pruskiej Akademii Nauk, najważniejsi członkowie tej szacownej instytucji – wśród nich Planck – docenili wybitny wkład młodego uczonego do fizyki, w którym błyszczała już wtedy szczególna teoria względności (ogólna teoria względności zostanie opublikowana kilka lat później). Akceptując kandydaturę, postanowili wybaczyć mu pomyłki w niektórych osądach: „Tego, że czasami myli się w swych spekulacjach, na przykład wysuwając hipotezę o kwantowej naturze światła, nie można mu zbytnio wyrzucać, gdyż jest rzeczą niemożliwą wprowadzenie naprawdę nowych koncepcji bez podjęcia pewnego ryzyka, nawet w naukach ścisłych”[10].

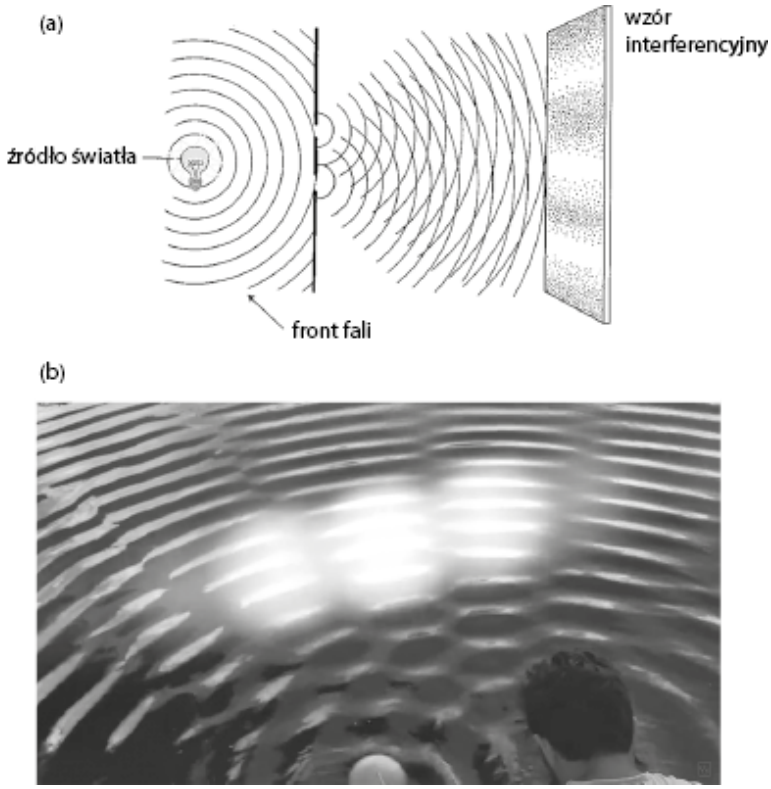
Einstein opublikował jednak krótki artykuł, w którym sugerował, że możliwe jest zyskanie dowodów potwierdzających kwantową naturę światła w badaniach *zjawiska fotoelektrycznego*. Jeżeli oświetli się powierzchnię metalu światłem o odpowiedniej częstotliwości i natężeniu, zostaną z niej wybite elektrony. W klasycznej teorii światła energia fali związana jest z amplitudą – wysokością szczytów i głębokością dolin fali – co najlepiej widać, gdy porównujemy łagodnie spienioną falę i gigantyczny wał tsunami. Energia ta znajduje odbicie w *natężeniu* fali albo, inaczej, w *jasności* światła. Jeśli, jak każdy wierzył, opis światła jest czysto falowy, wówczas zwiększanie natężenia światła jest jednoznaczne ze wzrostem energii i powinno prowadzić do płynnego zwiększania liczby elektronów wybitych z oświetlanej powierzchni oraz ich energii.

Tymczasem w ówczesnych eksperymentach nie obserwowano tego efektu. Wzór Plancka–Einsteina sugeruje, że ważna jest częstotliwość światła, a nie natężenie. Światło charakteryzujące się niewłaściwą częstotliwością, choćby miało bardzo duże natężenie, nie spowoduje wybicia elektronów. Tylko kwanty światła (fotony) o dostatecznej energii są w stanie wybić elektrony z powierzchni metalu. Wzrost natężenia światła po prostu zwiększa liczbę wybitych elektronów, ale nie ich energię.

W tamtym czasie takie zachowanie uznawano za mocno sprzeczne z intuicją, niemniej jednak potwierdzały je dalsze eksperymenty przeprowadzone mniej więcej dziesięć lat później, co ostatecznie przyczyniło się do przyznania Einsteinowi Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki za rok 1921.

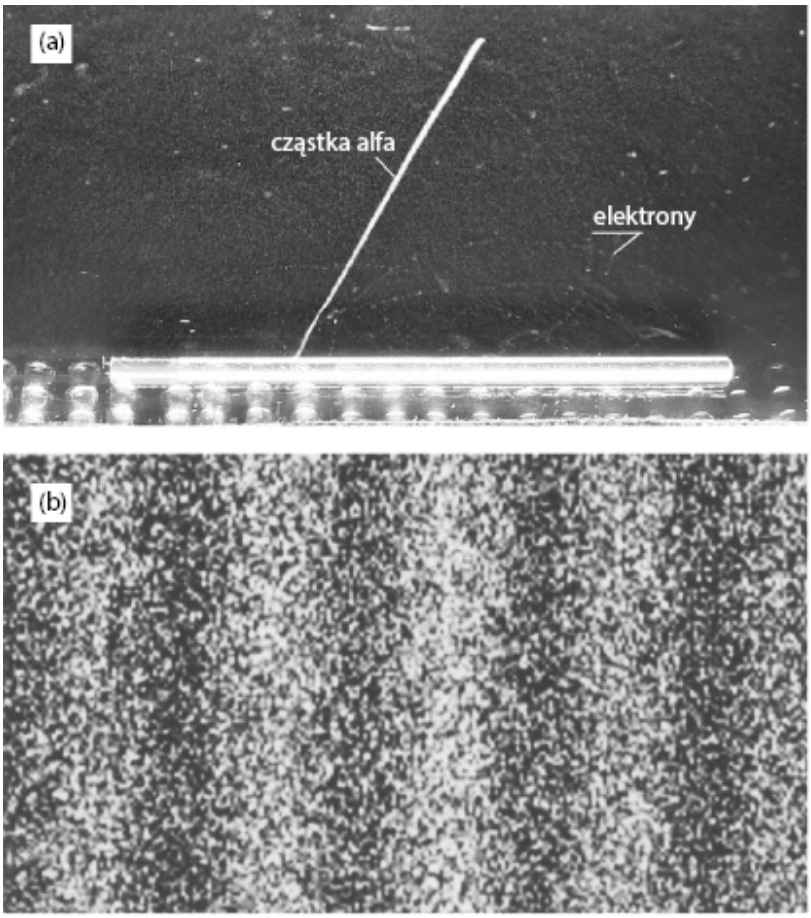
Było to wielkie osiągnięcie, ale pociągało za sobą równie wielki problem. Zebrano już znakomicie udokumentowane dowody przemawiające za słusznością falowej teorii światła. Jeśli pojedynczy promień jednobarwnego światła przepuści się przez wąską szczelinę lub mały otwór, których rozmiar jest porównywalny z długością fali światła, to promień ulegnie ugięciu na krawędziach i biegnie dalej szeroką wstęgą. Ulega „dyfrakcji". Na płycie fotograficznej, ustawionej w niewielkiej odległości za szczeliną, ukaże się szeroki pasek zamiast wąskiej linii o rozmiarach identycznych z wymiarami szczeliny[11].

Jeżeli w niewielkiej odległości znajdą się dwie szczeliny, uzyskamy *interferencję* – dowodem na jej zaistnienie są występujące na przemian jasne i ciemne paski, nazywane prążkami interferencyjnymi. Kiedy fala przechodzi przez obie szczeliny, każda z nich staje się źródłem fali. Te dwie fale rozchodzą się za szczelinami, wpadają na siebie i tam, gdzie spotykają się ze sobą dwa szczyty fal, otrzymujemy jeszcze wyższy szczyt (co nazywamy interferencją konstruktywną), natomiast tam, gdzie spotykają się ze sobą szczyty i doliny, mamy wygaszenie (interferencję destruktywną) – zob. rysunek 2a. Interferencja konstruktywna daje jasne prążki, destruktywna zaś prążki ciemne. Taki model zachowania nie dotyczy wyłącznie światła, dość łatwo zademonstrować interferencję fal na powierzchni wody, co obrazuje rysunek 2b.



Rysunek 2. (a) Przechodząc przez dwie wąskie, znajdujące się blisko siebie szczeliny, pojedyncza fala świetlna wytwarza wzór złożony z występujących naprzemiennie jasnych i ciemnych prążków. Zjawisko to bez trudu objaśnia falowa teoria światła, według której nakładające się na siebie fale interferują konstruktywnie (co skutkuje powstaniem jasnego prążka)

i destrukcyjnie (ciemny prążek). (b) Zjawisko interferencji nie ogranicza się do światła, łatwo pokazać je dla fal rozchodzących się na powierzchni wody[12].



Rysunek 3. (a) Ślady powstałe w komorze mgłowej po przejściu cząstki alfa i elektronów wyemitowanych z pręta promieniotwórczego toru. (b) Wzór interferencyjny wytworzony po przejściu elektronów przez dwie szczeliny.

Natomiast charakterystyczną cechą fal jest to, że *nie da się określić ich położenia*: są tu *i* tam jednocześnie. Hipoteza kwantów światła nie negowała wszystkich dowodów potwierdzających własności światła. Sugerowała jedynie, że kompletny opis wymaga uwzględnienia w jakiś sposób również własności typowych dla cząstek, które są dobrze umiejscowione. Einstein miał pomysł, jak to można byłoby to zrobić, i opowiemy o nim nieco później.

No dobrze, światło przejawia pewne dziwne własności, ale materia na pewno jest inna. Bez trudu można pokazać, że cząstki materii, takie jak elektrony, zachowują się w dużej mierze tak, jak moglibyśmy się tego po nich spodziewać. Na przykład wyraźnie dostrzegamy ślady ich ruchu w urządzeniach nazywanych komorami mgłowymi – zob. rysunek 3a[13]. Ilustracja pokazuje jasny ślad pozostawiony przez obdarzoną ładunkiem dodatnim cząstkę alfa (jądro atomu helu, złożone z dwóch protonów i dwóch neutronów) i szereg słabszych śladów po obdarzonych ładunkiem ujemnym elektronach, których trajektorie zostały zakrzywione przez przyłożone pole magnetyczne.

Najprostsze wyjaśnienie tych śladów jest takie, że ślady powstają wzdłuż toru lub trajektorii pojedynczych cząstek, które przechodzą przez komorę.

I tak docieramy do zmieniającego bieg historii odkrycia de Broglie'a. Dlaczego na siłę wprowadzać rozróżnienie na cząstki i fale? Jeśli fale świetlne mogą być jednocześnie cząstkami (fotonami, aczkolwiek nazwa ta nie została jeszcze w tamtym czasie przyjęta), to *może cząstki, tak jak elektrony, mogą być jednocześnie falami?* Pomysł wydaje się całkowicie absurdalny i rzeczywiście, niektórzy fizycy dyskredytowali go prześmiewczym określeniem „francuska komedia". Przywykliśmy do myślenia o cząstkach elementarnych, na przykład elektronach, jako o małych, dobrze umiejscowionych odłamkach materii obdarzonej ładunkiem elektrycznym, toteż wyobrażenie ich sobie w jakikolwiek inny sposób wiąże się z niemałym wysiłkiem myślowym.

Czytelnicy pamiętający telewizory z epoki poprzedzającej płaskie ekrany wykonane w technologii plazmy lub LCD wiedzą, że odbiorniki te zawierały jedno lub więcej dział elektronowych lub kineskopów, które wytwarzały wiązkę elektronów. Wiązki były następnie przyspieszane i poddawane modulacji, aby na ekranie fosforescencyjnym wygenerować obraz nadawany przez stacje telewizyjne.

Wyobraź więc sobie, że przepuszczamy wąską wiązkę elektronów przez przesłonę, w której wycięto dwie małe, umiejscowione blisko siebie szczeliny lub otwory.

Instynktownie spodziewalibyśmy się, że w takim eksperymencie z dwiema szczelinami elektrony w wiązce będą podążać torem przechodzącym przez jedną lub drugą szczelinę, jak pociski wystrzelone z karabinu, co będzie skutkować powstaniem na ekranie dwóch jasnych linii, dokładnie naprzeciwko szczelin, przez które przeszły elektrony. Oczekiwalibyśmy, że każda z tych jasnych linii będzie najjaśniejsza pośrodku, co pokaże, gdzie zetknęła się z ekranem większość elektronów przechodzących w sposób niezakłócony przez odpowiadającą linii szczelinę i coraz bardziej rozmyta, im dalej od centrum, gdzie z ekranem zetknęły się elektrony, które przechodziły przez szczelinę blisko jej krawędzi i uległy rozproszeniu. Eksperymenty takie jednak przeprowadzono i wcale nie zobaczono w nich tych spodziewanych rezultatów. Zamiast dwóch jasnych linii, charakterystycznych dla cząstek podążających przez szczeliny po liniach prostych, uzyskuje się wzór interferencyjny, jak ten na rysunku 3b.

Elektrony mogą być też falami.

Pomysł de Broglie'a był właśnie tym – pomysłem. Udało mu się wyprowadzić matematyczny wzór, wiążący wielkość charakterystyczną dla opisu falowego – długość fali – z wielkością charakterystyczną dla cząstek – pędem[14] – który wygląda następująco:

$$\text{długość fali } \lambda = \frac{\text{stała Plancka } h}{\text{pęd ciała}}$$

Jednak nie była to w pełni rozwinięta falowa teoria materii. Realizacja tego przedsięwzięcia spadła na Erwina Schrödingera. Sformułowanie jego autorstwa, opublikowane po raz pierwszy w 1926 roku, wciąż znajduje się w programie studiów na kierunkach ścisłych.

Wszystko, co, jak sądzimy, wiemy o układzie kwantowym, ma być zawarte w jego funkcji falowej

Teoria Schrödingera jest tak naprawdę klasyczną teorią fal, w której wzór de Broglie'a wykorzystywany jest jako środek do wprowadzenia długości fali w miejsce pędu. Operacja wymaga trochę matematycznej zręczności i przyjęcia pewnych założeń, które okazują się bezpodstawne. Choć Schrödinger opublikował znacznie bardziej skomplikowane wyprowadzenie, to wszystko tak naprawdę sprowadza się do tego, że efektem jest *równanie falowe Schrödingera*.

Pomocne będzie zatrzymanie się na chwilę i zastanowienie. Klasyczne równanie falowe zawiera *funkcję falową*, o której można myśleć jako o znajomej funkcji sinus, płynnie i w sposób ciągły oscylującej pomiędzy szczytami i dolinami. Równanie falowe opisuje więc ruch tej fali w przestrzeni i czasie. Wrzucamy teraz do tego stałą Plancka i pęd, wielkość charakterystyczną dla cząstek. Jeśli przyjmiemy klasyczną postać pędu, iloczyn masy i prędkości, dostrzeżemy, że teraz równanie falowe opisuje coś, co ma masę, i znajduje to odbicie w rozwiązaniu równania – w funkcjach falowych.

Jakim sposobem fala może mieć masę? Jest to jedna z konsekwencji dualizmu korpuskularno-falowego, od której może rozboleć głowa. A przecież dopiero zaczynamy.

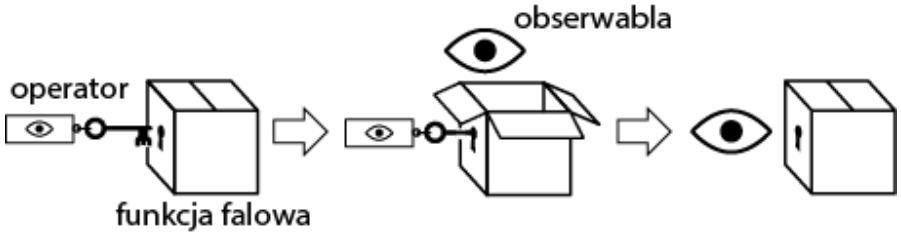
Fascynujące jest to, że od samego początku fizycy łamali sobie głowy nad funkcją falową Schrödingera. Jest dość oczywiste, jak funkcja falowa powinna być interpretowana w kontekście klasycznej teorii fal, lecz poza tym, że teraz zawiera wielkości charakterystyczne dla cząstek, takie jak masa i pęd, w mechanice fal Schrödingera funkcja falowa przyjmuje zupełnie inne znaczenie.

W mechanice klasycznej nie ma wielkich problemów z interpretacją występujących w teorii pojęć. Wydaje nam się, że wiemy, czym jest masa. Wiemy też, jak rozumieć prędkość i przyspieszenie. Są to wielkości, które możemy *obserwować* w sposób bezpośredni – zwykła obserwacja pozwala dostrzec różnice w przemieszczaniu się ciał i wskazać, które porusza się wolniej, a które szybciej. Kiedy siadamy za kierownicą sportowego samochodu i w niewiarygodnie krótkim czasie prędkość wzrasta od zera do setki albo gdy siedzimy w foteliku kolejki górskiej w wesołym miasteczku i śmigamy w dół,

czujemy przyspieszenie. Możemy wyliczyć pęd i wiemy, co oznacza wynik. Wartości te, nazywane przez fizyków „obserwablami", są solą klasycznych równań ruchu. Nie ma potrzeby, aby wysilać się na pogłębione analizy i doszukiwać jakichś ukrytych znaczeń tych wielkości. Ich sens jest oczywisty, nie ma wątpliwości, jak należy je interpretować.

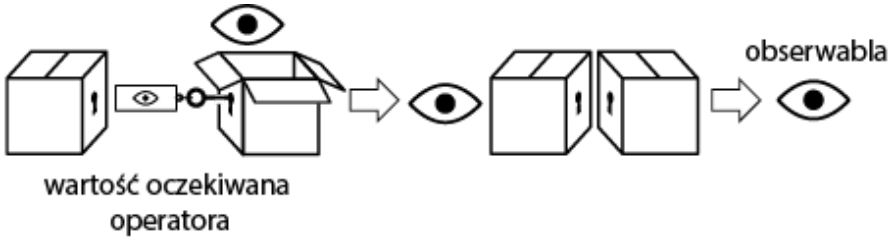
Teraz spójrzmy, czego od nas żąda mechanika falowa Schrödingera. Chcemy poznać pęd elektronu, poruszającego się swobodnie w próżni? Cóż, trzeba rozwiązać równanie falowe i zidentyfikować odpowiednią funkcję falową, wyznaczyć tempo zmian tej funkcji falowej w przestrzeni i pomnożyć wynik przez minus pierwiastek kwadratowy z liczby minus jeden razy stała Plancka podzielona przez 2π[15]. W wyniku tych zabiegów uzyskujemy pęd pomnożony przez funkcję falową, skąd możemy wyprowadzić pęd.

W mechanice falowej Schrödingera (jak też ogólnie w mechanice kwantowej) wyliczamy takie obserwable, jak pęd i energia, wykonując właściwe operacje matematyczne na odpowiedniej funkcji falowej. Manipulacje te są potem zbiorczo podsumowywane jako *operatory* obserwabli. Operatory są matematycznymi przepisami, o których możemy myśleć jak o „kluczach" otwierających funkcję falową (przedstawioną na poniższym rysunku jako pudełko) i uwalniających obserwablę, zanim pudełko ponownie zostanie zamknięte. Logika jest następująca:



Opis zawarty w powyższym akapicie określa, czym w mechanice kwantowej jest operator matematyczny (klucz) dla pędu. Musimy wykonać jeszcze jeden mały krok. Nie podam szczegółów w tym miejscu, ale dość łatwo jest wydedukować wielkość określaną

mianem *wartości oczekiwanej* operatora, a będącą swego rodzaju wartością średnią. Wielkość ta ma pomocną właściwość:



Kiedy dwa identyczne pudełka zostaną zestawione ze sobą w taki sposób, jakby stanowiły dla siebie „lustrzane odbicie", co pokazuje powyższy rysunek, i jeśli wszystko zostanie wykonane poprawnie, wówczas takie połączenie daje w wyniku liczbę 1. Tym samym dostajemy obserwablę, a więc wartość oczekiwana dostarcza użytecznego przepisu na obliczenie wartości obserwabli takich jak pęd lub energia.

Mocna rzecz. Nie trzeba być geniuszem, aby zdać sobie sprawę z tego, że doszło tu do fundamentalnej zmiany. Zupełnie jakby natura zdecydowała się ukryć swoje tajemnice w kwantowej funkcji falowej, stąd piktogram zamkniętego pudełka. Aby odkryć wartość obserwabli, musimy otworzyć pudełko za pomocą odpowiedniego klucza (operatora). Otwarcie pudełka jednym rodzajem klucza daje nam jeden rodzaj obserwabli, na przykład pęd. Uzyskanie innej obserwabli będzie wymagać innego klucza.

Nigdy nie mieliśmy do czynienia z czymś podobnym w mechanice klasycznej. Obserwable zawsze były dostępne na wyciągnięcie ręki, jawnie widoczne.

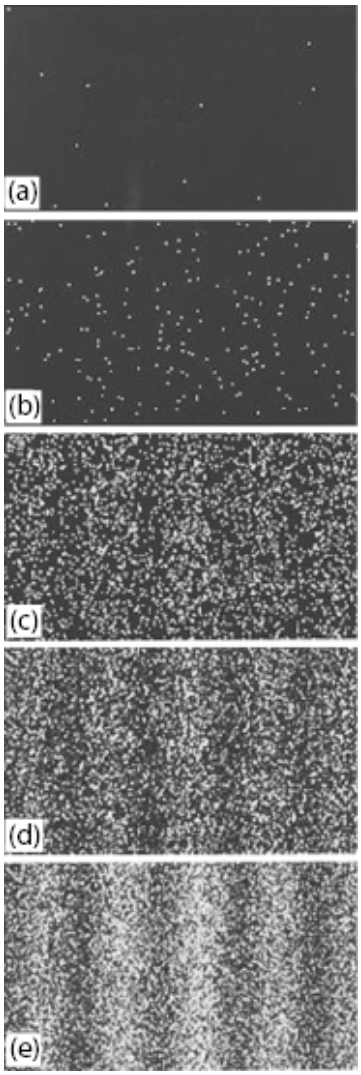
Poważnie, elektrony naprawdę zachowują się jak fale

W tym miejscu chciałbym, abyśmy cofnęli się do wzoru interferencyjnego dla elektronów, przedstawionego na rysunku 3b. Moglibyśmy zbyć go wzruszeniem ramion i przyjąć do wiadomości, że elektron ma naturę falową, bez łamania sobie głowy, cóż może to oznaczać. Zmodyfikujmy jednak eksperyment. Zredukujmy natężenie wiązki elektronów w taki sposób, że w danym momencie przez szczeliny przechodzi przeciętnie tylko *jeden* elektron. Co wtedy?

Z początku to, co ukazuje się naszym oczom, jest pocieszające. Przejście każdego elektronu przez szczeliny odnotowywane jest pojedynczą jasną plamką na ekranie fosforescencyjnym, mówiącą nam: „tutaj uderzył elektron”. Jest to idealnie spójne z naszym wcześniejszym poglądem, iż elektrony są cząstkami, można bowiem odnieść wrażenie, że przechodzą – jeden po drugim – przez jedną lub drugą szczelinę i docierają do ekranu, tworząc na nim, jak się zdaje, całkowicie losowy wzór – zob. rysunek 4a.

Zaraz, zaraz. Wzór nie jest wcale losowy. W miarę jak coraz więcej elektronów przechodzi przez szczeliny, coś się zmienia. Zaczynamy dostrzegać, że pojedyncze kropki łączą się w grupy, nakładają się na siebie, zlewają. Koniec końców uzyskujemy typowy obraz interferencyjny, złożony z jasnych i ciemnych prążków, jak na rysunku 4e.

Szybko odkrywamy, że gdy zakryjemy jedną ze szczelin albo spróbujemy się dowiedzieć, przez którą szczelinę przechodzi dany elektron, wzór interferencyjny znika. Dostajemy po prostu zachowanie typowe dla cząstek podążających po linii prostej. Jeśli spróbujemy podejrzeć, co leży u podstaw zachowania typowego dla fal, dostajemy zachowanie charakterystyczne dla cząstek. Jeśli nie próbujemy dociekać, skąd bierze się zachowanie typowe dla fal, dostajemy zachowanie charakterystyczne dla fal. Kiedy elektron w pojedynkę dociera do przegrody z dwiema szczelinami, wydaje się, że jego zachowanie musi w jakiś sposób zależeć od istnienia szczeliny, przez którą *nie przechodzi*, co jest bardzo dziwne.



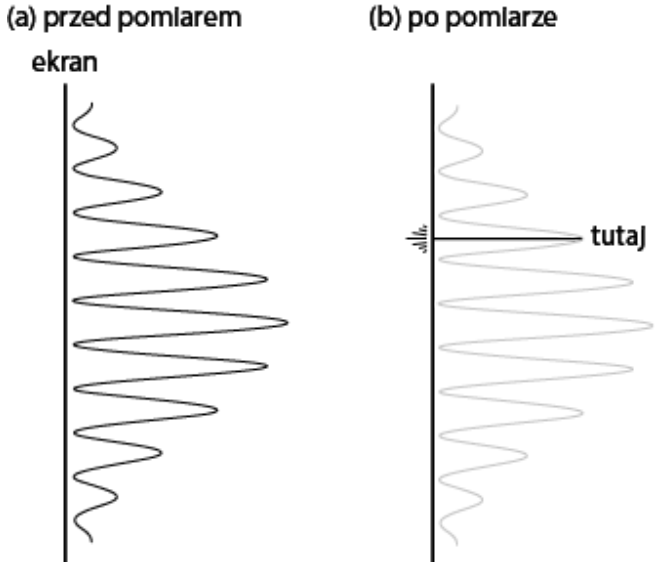
Rysunek 4. Możemy obserwować przechodzenie elektronów, jeden po drugim, przez aparaturę z dwiema szczelinami, rejestrując uderzenia elektronów w kliszę fotograficzną. Kolejne fotografie od (a) do (e) ukazują wyniki doświadczenia, gdy zarejestrowano odpowiednio 10, 100, 3000, 20 000 i 70 000 elektronów.

Możemy też wysnuć alternatywny wniosek, iż elektron *z natury* przejawia zachowanie falowe. *Każdy pojedynczy elektron zachowuje się jak fala*, opisywana przez funkcję falową, przechodzi przez obie szczeliny jednocześnie i interferuje sam ze sobą jeszcze przed uderzeniem w ekran.

To skąd mamy wiedzieć, *gdzie* dokładnie pojawi się kolejny elektron?

Funkcja falowa daje nam jedynie prawdopodobieństwa: w mechanice kwantowej możemy wiedzieć tylko, co może się wydarzyć, a nie, co się wydarzy

Fala zmienia się od amplitudy na wartościach dodatnich, czyli najwyższego szczytu fali, do amplitudy na wartościach ujemnych, czyli najgłębszej doliny. Natężenie fali obliczamy jako *kwadrat* jej amplitudy, który zawsze jest liczbą dodatnią. Gdy więc opisujemy interferencję na dwóch szczelinach wyłącznie w kontekście teorii falowej, wyobrażamy sobie, że w wyniku interferencji powstaje fala, w przypadku której podniesienie amplitudy do kwadratu odtworzy charakterystyczny wzór; występują w nim obszary o wysokim natężeniu (jasne prążki) i obszary o zerowym natężeniu (ciemne prążki), jak pokazuje rysunek 5a.



Rysunek 5. (a) Przed pomiarem kwadrat funkcji falowej elektronu przewiduje rozkład prawdopodobieństwa tego, gdzie można napotkać elektron – jest to obszar całego ekranu. (b) Po pomiarze elektron jest zarejestrowany i można go znaleźć w jednym i tylko jednym miejscu na ekranie.

Tylko że wzór odzwierciedlający natężenie rozciąga się na całym ekranie. Jest *rozłożony* w przestrzeni albo, inaczej, zdelokalizowany. Tymczasem wiemy przecież, że w eksperymencie z elektronami, jak na rysunku 4, elektrony są rejestrowane jeden po drugim, jako

pojedyncza jasna plamka, tylko w *jednym* miejscu na ekranie. Każdy docierający do ekranu elektron jest zlokalizowany.

Jak to działa?

Schrödinger chciał interpretować funkcję falową dosłownie, jako teoretyczne odzwierciedlenie „fali materii". Twierdził, że atomy są jedynie wzorami dyfrakcyjnymi fal elektronowych pochwyconych i owiniętych wokół jądra atomowego. Jeśli jednak szukamy sensu w interferencji pojedynczego elektronu, musimy sięgnąć po późniejszą, alternatywną interpretację, zaproponowaną w 1926 roku przez Maxa Borna.

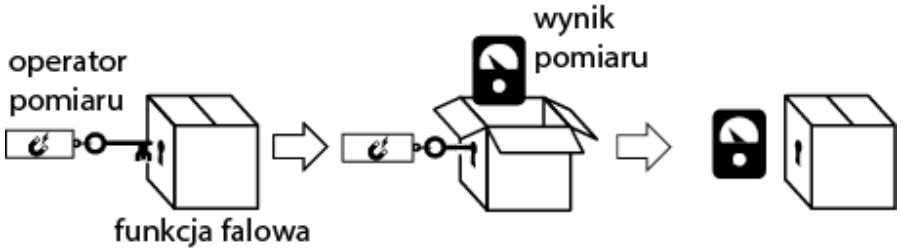
Born doszedł do wniosku, że w mechanice kwantowej kwadrat funkcji falowej nie jest miarą natężenia fali elektronowej, ale *prawdopodobieństwa* „znalezienia" związanego z tą falą elektronu[16]. Płynna zmienność fali elektronowej, od szczytów do dolin, przekłada się na wzór kwantowych prawdopodobieństw – w miejscu, gdzie powstanie jasny prążek, istnieje większe prawdopodobieństwo znalezienia kolejnego elektronu, natomiast w miejscu, gdzie powstanie ciemny prążek, istnieje bardzo małe prawdopodobieństwo znalezienia kolejnego elektronu.

Pomyśl tylko, co tu się dzieje. Zanim elektron dotrze do ekranu, istnieje prawdopodobieństwo znalezienia go „tutaj", „tam" czy w „jakimkolwiek miejscu", gdzie kwadrat funkcji falowej jest większy od zera.

Czy to znaczy, że pojedynczy elektron może być jednocześnie w kilku miejscach? Ależ nie, niezupełnie. Można powiedzieć, że istnieje prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w wielu miejscach, jak też na pewno ma sens myślenie o funkcji falowej elektronu w kontekście delokalizowania lub rozłożenia w przestrzeni. Jeśli jednak zwrot „pojedynczy elektron" miałby odnosić się do elektronu rozumianego jako cząstka, to wówczas jest również sens w stwierdzeniu, że *nie istnieje* on jako cząstka dopóty, dopóki jego funkcja falowa nie wejdzie w oddziaływanie z ekranem, kiedy to

pojawia się on „tutaj”, tylko w jednym miejscu, jak pokazuje to rysunek 5b.

Rodzący się tu pewien problem po raz pierwszy dostrzegł John von Neumann na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych XX wieku. Jeżeli „pomiar” jest tylko jeszcze jednym rodzajem zjawiska lub przejścia kwantowego, to według von Neumanna sugerowałoby to potrzebę korzystania z „operatora pomiaru”, który działałby tak:



Wynik pomiaru jest więc tylko wartością oczekiwaną operatora pomiaru.

Tak jak w przypadku rozłożonego w przestrzeni wzoru interferencyjnego z rysunku 5a, pokazana na powyższym rysunku funkcja falowa zawiera różne ewentualne wyniki pomiaru, choćby ruch wskazówki w lewo albo w prawo. Von Neumann zdał sobie sprawę z tego, że w matematycznej strukturze mechaniki kwantowej nie ma nic, co tłumaczyłoby, jak z wielu *możliwych* wyników przechodzimy do tylko jednego, *właściwego*. Aby zatem zapewnić strukturze matematyczną solidność i spójność, nie miał wyboru – zmuszony był *postulować* istnienie nieciągłego przejścia lub przeskoku, który przenosi nas z możliwego do właściwego wyniku. Postulat ten jest dziś ogólnie znany pod nazwą „kolapsu funkcji falowej”. Jest absolutnie kluczowym zagadnieniem dla toczącego się sporu o to, jak ma być interpretowana teoria kwantowa.

Prawdopodobieństwo kwantowe nie jest tym samym, co prawdopodobieństwo klasyczne

Jeszcze jedno. To, że istnieje 50-procentowe prawdopodobieństwo wypadnięcia „orła”, po prostu oznacza, iż moneta ma dwie strony i nie mamy żadnego sposobu, aby się dowiedzieć (albo bez trudu

przewidzieć), którą z tych stron ujrzymy, gdy moneta wyląduje. To klasyczna forma prawdopodobieństwa, mająca źródło w niewiedzy. Możemy mieć pewność, że obracająca się w powietrzu moneta nadal ma dwie strony, orła i reszkę, ale nie mamy wiedzy o każdym najdrobniejszym szczególe tego ruchu, nie da się więc bez jakiejkolwiek niepewności przewidzieć, na którą z tych dwóch stron moneta upadnie.

O kwantowym prawdopodobieństwie myślimy zupełnie inaczej. Kiedy rzucamy monetą kwantową[17], możemy znać dość dużo szczegółów dotyczących jej ruchu, ale nie da się przyjąć założenia, że „orzeł" i „reszka" *istnieją* przed tym, nim moneta wyląduje i ją obejrzymy.

Einstein potępił ten czynnik, zdawałoby się, czystej losowości w mechanice kwantowej. Jego opinia na ten temat zawiera się w słynnym cytacie: „Bóg nie gra w kości"[18].

Dla danego układu fizycznego lub sytuacji nie ma czegoś takiego jak „właściwa" funkcja falowa

Fizyka jest zaliczana do nauk ścisłych. Rozumiem przez to, że formułowane przez nią teoretyczne opisy oparte są na rygorystycznej matematyce, nie na słowach lub frazach, które często bywają niejednoznaczne i mylące. Jednak matematyka to wciąż język i choć możemy zachwycać się jej niewiarygodną płodnością i „niedorzeczną skutecznością"[19], to niezwykle łatwo jest o mylne odczytanie jej przesłania i zejście na manowce, gdy nie zachowa się należytej staranności.

Wiele wieków naznaczonych wielkimi sukcesami fizyki opartej na matematycznych podstawach ugruntowały w nas wiarę, że wszystko sprowadza się do uzyskania dobrej odpowiedzi. Natura zachowuje się w określony sposób. Robimy *to* i dzieje się *tamto*. Za każdym razem. Jeśli matematyka nie przewiduje zawsze z absolutną pewnością, że stanie się *tamto*, gdy robimy *to*, wówczas jesteśmy skłonni zaakceptować wniosek, że matematyczny opis nie jest zadowalający i potrzebujemy nowej teorii.

W mechanice kwantowej musimy mierzyć się z kilkoma sprawami, które mogą robić wrażenie sprzecznych z intuicją. Wciąż jednak jest to teoria oparta na matematyce. Oczywiście, zamieniliśmy stare, klasyczne obserwable, takie jak pęd i energia, na operatory matematyczne, których używamy do wyjmowania ich kwantowych odpowiedników z pudełka nazywanego funkcją falową, ale – by powołać się na pierwszy z brzegu przykład – częstotliwości (a więc i energie) linii widma atomowego są wyznaczane z niezwykłą precyzją, wystarczy spojrzeć jeszcze raz na rysunek 1. Jeżeli mechanika kwantowa potrafi przewidywać, jak powinny wyglądać te linie, to z pewnością musi to oznaczać, że odkryto precyzyjne wyrażenie na funkcję falową elektronu.

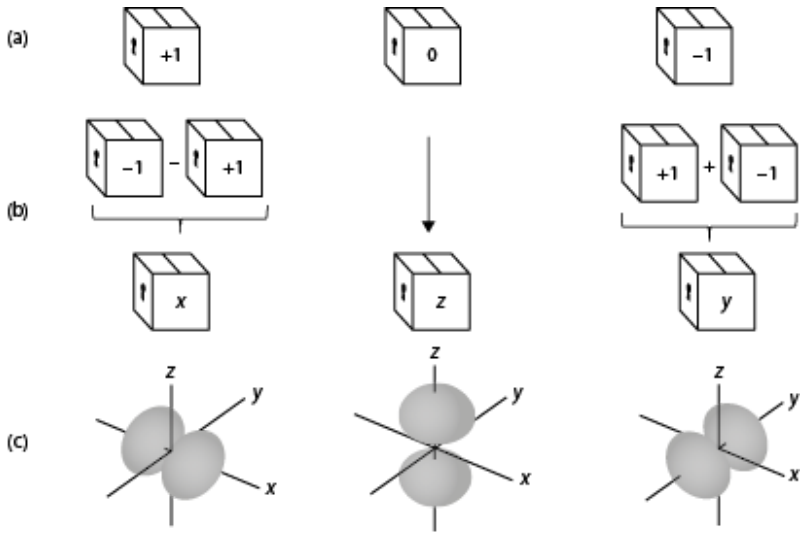
I w tym miejscu napotykamy kolejny brudny sekrecik mechaniki kwantowej. Tak naprawdę nie ma czegoś takiego jak „właściwa" funkcja falowa. Wszystko, czego nam trzeba, to funkcja, która jest prawidłowym rozwiązaniem funkcji falowej. Czy nie wystarcza to do zdefiniowania „właściwej" funkcji falowej? Otóż nie, nie bardzo. Podczas gdy istnieją pewne reguły matematyczne, którym musimy się podporządkować, to jednak możemy wziąć dowolną liczbę różnych rozwiązań i połączyć je ze sobą, co znane jest jako *superpozycja*. Wynik takiego łączenia również stanowi bardzo dobre rozwiązanie funkcji falowej.

Chcę zilustrować to pewnym przykładem z kwantowej teorii atomu wodoru, który zbudowany jest z jądra, będącego pojedynczym protonem, oraz „krążącego" wokół niego elektronu. Jest to ten sam problem, który z tak oszałamiającym sukcesem opisywał Schrödinger w swoim artykule z 1926 roku. Funkcje falowe o najniższej energii mają sferyczny kształt wokół położonego centralnie jądra, ale są też funkcje o średniej energii, które kształtem przypominają hantle. Jest ich trzy.

Wszystkie te trzy rozwiązania funkcji falowej są opisywane przez zestaw liczb kwantowych. Dwie z nich są identyczne dla każdej funkcji w kształcie hantli, ale trzecia liczba kwantowa jest dla każdej funkcji inna, przyjmując wartości –1, 0 i +1, jak pokazuje rysunek 6a. Na razie nie ma znaczenia, co liczby te oznaczają, chodzi o co innego. Podczas gdy są to „naturalne" rozwiązania funkcji falowej,

okazują się niezbyt pomocne, gdy rozważamy łączenie atomów w trójwymiarowej przestrzeni w cząsteczki, a przecież takie połączenia pomiędzy atomami są fundamentalne dla *chemii*.

Znacznie łatwiej radzić sobie z funkcjami falowymi zdefiniowanymi w trzech wymiarach przestrzennych za pomocą współrzędnych kartezjańskich *x*, *y*, *z*. Jest to łatwe w odniesieniu do funkcji charakteryzowanej liczbą kwantową 0 – po prostu określimy, że skierowana jest ona wzdłuż osi *z*. Co z pozostałymi? Cóż, okazuje się to stosunkowo nieskomplikowane. Aby uzyskać funkcję falową skierowaną wzdłuż osi *y*, tworzymy superpozycję, w której *dodajemy* funkcje odpowiadające liczbom kwantowym –1 oraz +1, jak pokazano na rysunku 6b. Chcąc otrzymać funkcję falową skierowaną wzdłuż osi *x*, tworzymy superpozycję, w której odejmujemy funkcję odpowiadającą liczbie kwantowej +1 od funkcji odpowiadającej liczbie kwantowej –1. Ponieważ łączymy funkcje, które są znanymi rozwiązaniami funkcji falowej, oraz postępujemy według reguł, możemy mieć pewność, że superpozycje również są poprawnymi rozwiązaniami. Powstałe funkcje ukazane są na rysunku 6c w trójwymiarowym układzie współrzędnych.



Rysunek 6. „Naturalne” rozwiązania równania falowego Schrödingera dla atomu wodoru zawierają zbiór funkcji falowych charakteryzowanych przez liczby kwantowe o wartościach +1, 0 i –1. Często bardziej pomocne jest łączenie ich w sposób pokazany na powyższym rysunku, który pozwala uzyskać trzy funkcje falowe skierowane wzdłuż trzech osi trójwymiarowego

układu współrzędnych kartezjańskich *x*, *y*, *z*. Która z tych funkcji falowych jest zatem tą „właściwą”?

Która z powyższych funkcji falowych jest tą „właściwą”? Studenci dość szybko uczą się, że nie ma prostej odpowiedzi na to pytanie. To, która funkcja falowa jest „właściwa”, w oczywisty sposób zależne jest od tego, z jakim rodzajem układu mamy do czynienia, ale wolno nam wybrać tę formę, która najbardziej nadaje się do konkretnego problemu, jaki próbujemy rozwiązać.

Zdelokalizowane fale mogą być łączone ze sobą w sposób, który jest po prostu niedostępny dla cząstek zlokalizowanych. Mamy pełne prawo wykorzystać to w mechanice kwantowej.

Zasada nieoznaczoności Heisenberga mówi o tym, co możemy wiedzieć, a nie o tym, co mamy nadzieję zmierzyć

Werner Heisenberg nienawidził mechaniki falowej Schrödingera. Nie dlatego, że matematyka wyglądała podejrzanie, ale z powodu nalegań Schrödingera, aby traktować funkcję falową dosłownie, przypisując jej rolę fizycznego opisu elektronu jako fali materii. Problem w tym, że fale rozchodzą się płynnie i w sposób ciągły, w tym obrazie nie ma miejsca na nagłe przeskoki kwantowe, w rodzaju tych potrzebnych do interpretowania przejść leżących u podstaw widma atomowego. Schrödinger po prostu rzucił wszystko na jedną szalę i zaprzeczył, że takie przeskoki w ogóle się zdarzają, stwierdzając: „Jeśli te przeklęte przeskoki kwantowe miałyby zadomowić się na dobre, to pożałuję, że kiedykolwiek zabrałem się do teorii kwantowej”[20].

W 1927 roku Heisenberg uświadomił sobie, że ta zasadnicza nieciągłość – „zdolność do przeskoków” – w samym sercu mechaniki kwantowej prowadzi do fundamentalnych ograniczeń nakładanych na to, czego możemy się dowiedzieć o wartości par fizycznych obserwabli, takich jak położenie i pęd. Z początku wierzył, że ograniczenie to wynika z nieuniknionej „niezdarności”, odciskającej piętno na procesie dokonywania pomiarów na delikatnych układach

kwantowych za pomocą naszych wielkoskalowych instrumentów laboratoryjnych. Heisenberg twierdził na przykład, że jeśli chcemy precyzyjnie ustalić położenie elektronu w przestrzeni, to lokalizujemy go przez trafienie fotonami o tak dużej energii, iż musimy porzucić nadzieję na dokładne wyznaczenie pędu elektronu. Każda próba „zobaczenia", gdzie jest elektron (albo przynajmniej, gdzie był), skończy się dla niego takim szokiem, że skutecznie uniemożliwi nam zobaczenie, dokąd i jak szybko się przemieszczał.

Bohr wyraził sprzeciw i rozgorzał zaciekły spór. Bohr uparcie trwał na stanowisku, że zasada nieoznaczoności nie ma nic wspólnego z niezdarnością albo ogólniej, z naszymi pomiarami. Według niego nakłada ona fundamentalne ograniczenie na to, co możemy *wiedzieć* o układzie kwantowym.

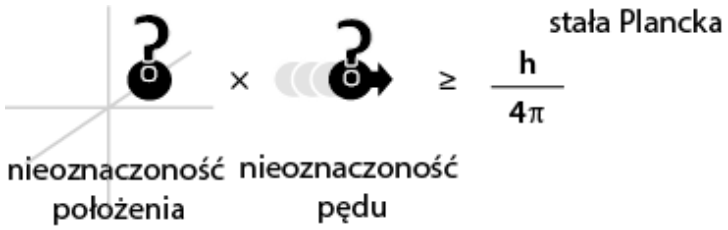
Być może najprostszy sposób objaśnienia stanowiska Bohra wynika z odwołania się do kluczowego w mechanice kwantowej dualizmu korpuskularno-falowego. Zastanówcie się, jak moglibyśmy zmierzyć długość fali. Można zliczać szczyty i doliny fali w jakimś wybranym obszarze przestrzeni. Każdy pojedynczy okres fali zawiera jeden szczyt i jedną dolinę, a długość fali to odległość między dwoma kolejnymi szczytami lub dwiema kolejnymi dolinami. Wystarczy więc zliczyć wszystkie szczyty, dodać liczbę dolin, a potem podzielić sumę przez dwa. Uzyskamy w ten sposób liczbę okresów fali, jaka mieści się w naszym obszarze przestrzeni. Długość fali jest zatem równa długości tego obszaru podzielonej przez liczbę okresów.

Rzecz jasna, będziemy mieli poważny kłopot z uzyskaniem precyzyjnego pomiaru w sytuacji, gdy nasz badany obszar jest *krótszy* niż długość fali. Szybko dociera do nas, że można zwiększyć dokładność, gdy obszar będzie na tyle duży, by pomieścił wiele okresów. Jednocześnie ze wzoru de Broglie'a wynika, że precyzyjnie wyznaczona długość fali pozwala bardzo dokładnie wyliczyć pęd stowarzyszonej z falą cząstki. Tymczasem jednak, oczywiście, celowo uczyniliśmy obszar badawczy bardzo dużym, toteż możemy porzucić nadzieję na precyzyjne wyznaczenie położenia cząstki. Może ona być wszędzie w tym obszarze.

Rozumowanie odwrotne również jest prawdziwe. Można dodać do siebie dużą liczbę fal w superpozycji, z których każda ma inną

długość, uzyskując falę o pojedynczym szczycie, którego położenie będzie znane z bardzo dużą dokładnością. Taką superpozycję nazywamy „pakietem falowym”. Owszem, znamy teraz bardzo dokładnie położenie, ale straciliśmy nadzieję na wyznaczenie pędu z jakąkolwiek precyzją, nasz pakiet falowy bowiem obejmuje szeroki zakres długości fal, a co za tym idzie, szeroki zakres pędów.

Pogląd Bohra wziął górę i obecnie zasadę nieoznaczoności Heisenberga zapisujemy wzorem[21]



Zauważmy, że nigdzie nie ma mowy o tym, iż pomiary położenia i pędu w jakiś sposób wzajemnie się wykluczają. Zasadniczo możemy zmierzyć położenie z idealną precyzją (zerową nieoznaczonością), lecz pęd staje się wówczas całkowicie nieokreślony: jego nieoznaczoność sięga nieskończoności. Nic nie stoi na przeszkodzie, abyśmy jednocześnie wyznaczyli położenie i pęd ze skromniejszą precyzją, spełniającą warunek nakładany przez zasadę nieoznaczoności.

Zasada ta nie ogranicza się jedynie do położenia i pędu. Ma zastosowanie również do innych par obserwabli. Zapewne najbardziej znaną z tych par jest energia i czas, o których będziemy mówić ponownie w rozdziale 4. Trzeba w tym miejscu wspomnieć o pewnym zastrzeżeniu. Istnieje pogląd, iż nieoznaczoność czasu i energii tak naprawdę nie istnieje, jest tylko odmianą związku łączącego położenie i pęd. Wczesne próby wyprowadzenia związku dla energii i czasu z pierwszych zasad przyniosły mało satysfakcjonujące wyniki. O ile mi wiadomo, najszerszą akceptację zyskała praca opublikowana w 1945 roku przez Leonida Mandelstama i Igora Tamma, w której występujący we wzorze czas jednoznacznie interpretowany jest jako *interwał* czasu.

Sądzę, że na razie wystarczy. Chcę, abyście mieli pewność, że wszystko, co do tej pory opisałem, oparte jest na „autoryzowanej”

lub „oficjalnej” wersji mechaniki kwantowej, wykładanej studentom fizyki na całym świecie. W części drugiej przekonamy się, że w miarę trwania krucjaty w poszukiwaniu sensu przez ostatnie 90 lat z okładem fizycy i filozofowie ochoczo podważali te ustalenia, nie powinniśmy więc zakładać, że wersja nauczana dzisiaj wciąż będzie wykładana za następne 90 lat.

Czytelnicy obeznani z tematyką zapewne zauważyli, że celowo pominąłem pewne bardziej niesławne przykłady kwantowych dziwactw – takie jak kot Schrödingera i eksperyment Einsteina–Podolskiego–Rosena. Trochę cierpliwości: pojawią się one w rozdziale 4. Chcę najpierw nakreślić tło, które pozwoli umieścić rozmyślania na ich temat w pewnym kontekście.

Podsumowując, zobaczyliśmy, że odkrycia eksperymentalne poczynione w pierwszych dziesięcioleciach XX wieku doprowadziły do ugruntowania przekonania, iż fizyczna rzeczywistość jest z natury ziarnista. W mechanice klasycznej, znanej z codziennego życia, bez żadnego ryzyka możemy śmiało zignorować stałą Plancka i wynikającą z jej istnienia ziarnistość, przyjmując, że wszystko jest gładkie i ciągłe. Jednak na poziomie cząsteczek, atomów i cząstek subatomowych stała Plancka zaczyna odgrywać pierwszoplanową rolę i nie można już dłużej ignorować dualizmu korpuskularno-falowego.

Puszkę Pandory otworzył de Broglie w 1923 roku. Kilka lat później Schrödinger dał nam równanie falowe i funkcje falowe. Doskonale znane obserwable z mechaniki klasycznej zostały zamknięte we wnętrzu kwantowej funkcji falowej i uwolnienie ich z tego więzienia wymagało stosowania specjalnych operatorów matematycznych. Born powiedział, że funkcje falowe są całkowicie nieprzeniknione. Dają nam jedynie informację na temat prawdopodobieństwa. Heisenberg i Bohr wytłumaczyli, że serce mechaniki kwantowej bije w takt nieoznaczoności. Natura cierpi na szczególny rodzaj arytmii.

I wtedy rozgorzał spór. Co mechanika kwantowa mówi nam o naturze fizycznej rzeczywistości? Czym w ogóle jest to, co nazywamy rzeczywistością?

8 Umieściłem słowo „krążących” w cudzysłowie, ponieważ elektron nie krąży wokół jądra w ten sam sposób jak Ziemia wokół Słońca. Już wkrótce przekonamy się, że tak naprawdę robi coś dużo bardziej interesującego.

9 Określenie „ciało doskonale czarne” nie ma nic wspólnego z barwą ścian wnęki, ale związane jest raczej ze sposobem, w jaki ściany pochłaniają i emitują uwięzione wewnątrz promieniowanie. Teoretycznie ciało „doskonale czarne” pochłania i emituje promieniowanie „idealnie”, co znaczy, że promieniowanie nie zależy od tego, z jakiej substancji wykonane są ściany wnęki.

10 Cyt. za: Abraham Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany... Nauka i życie Alberta Einsteina*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 386.

11 Jeśli jednak przyjrzeć się bliżej, to można się przekonać, że krawędzie tego paska wykazują charakterystyczny *wzór dyfrakcyjny*, złożony z występujących na przemian jasnych i ciemnych „prążków”.

12 Efekt można obejrzeć tutaj: https://youtu.be/Iuv6hY6zsd0?t=254 (dostęp: 21.12.2020).

13 Komora mgłowa została wynaleziona przez Charlesa Wilsona. Działa następująco: przez komorę wypełnioną parą wodną przepuszczana jest wysokoenergetyczna cząstka obdarzona ładunkiem elektrycznym; w trakcie tego przejścia wybija ona elektrony z atomów gazu, zostawiając za sobą naładowane elektrycznie jony; wokół tych jonów dochodzi do kondensacji cząsteczek wody, które ujawniają trajektorię cząstki.

14 W mechanice klasycznej pęd ciała poruszającego się po linii prostej wylicza się jako iloczyn masy ciała i prędkości. Jednak w mechanice kwantowej pęd wyznacza się inaczej, co już niebawem zobaczymy.

15 Pierwiastek kwadratowy z liczby minus jeden to „liczba urojona”, zwykle oznaczana symbolem *i*. Może wydawać się to zawiłe, ale nieustannie przewija się w różnych zagadnieniach z zakresu matematyki i fizyki. Wystarczy, że zapamiętamy, iż $i^2 = -1$.

16 Ściśle mówiąc, ponieważ funkcja falowa może zawierać *i*, pierwiastek kwadratowy z −1, to mnożymy ją przez jej *sprzężenie zespolone*, w którym *i* zastąpiono wartością $-i$ (ponieważ $-i \times i = -i^2 = +1$), tak więc zawsze jako wynik uzyskujemy liczbę dodatnią. Jest to kwadrat modułu funkcji falowej. Można go przedstawić jako dwa zamknięte pudełka, ustawione naprzeciw siebie.

17 W dalszych rozdziałach przekonamy się, jak można zrealizować to w praktyce.

18 Einstein napisał: „Mechanika kwantowa jest teorią wielce zajmującą. Niemniej jakiś wewnętrzny głos mówi mi, że nie jest ona tym, o co ostatecznie chodzi. Mimo tak znakomitych wyników teoria ta nie przybliża nas wcale do tajemnicy Prajedni. Tak czy owak, jestem głęboko przeświadczony, że Bóg nie gra w kości" (list do Maxa Borna, 4 grudnia 1926 roku, cyt. za: Abraham Pais, op. cit., s. 446).

19 „Niedorzeczna skuteczność matematyki w naukach przyrodniczych" to tytuł wykładu wygłoszonego 11 maja 1959 roku przez Eugene'a Wignera na Uniwersytecie Nowojorskim w ramach wykładów imienia Richarda Couranta z nauk matematycznych. Jego treść została opublikowana w „Communications on Pure and Applied Mathematics" 1960, nr 13, s. 1–14.

20 Cyt. za: Werner Heisenberg, *Physics and Beyond: Memories of a Life in Science*, George Allen & Unwin, Londyn 1971, s. 75.

21 Znak ≥ oznacza „jest większe lub równe". Symbol ten działa tak samo jak znak równości. Na przykład obie strony możemy podzielić przez nieoznaczoność pędu, uzyskując: nieoznaczoność położenia ≥ h/(4π×nieoznaczoność pędu). Od razu wtedy widać, że jeśli nieoznaczoność pędu jest równa zeru, to nieoznaczoność położenia będzie równa nieskończoności.

ROZDZIAŁ 2

A tak w ogóle czym jest to, co nazywamy „rzeczywistością”?

Filozof i naukowiec: metafizyczne prekoncepcje i dane empiryczne

To komunał, ale im jestem starszy, tym mniej we mnie cierpliwości, tym większy ze mnie stary zrzęda. Czuję narastające rozdrażnienie ewidentną niezdolnością naszego gatunku do czerpania jakiejkolwiek nauki z przeszłości. Z pewnością nie chodzi tu o irytację zrodzoną z tęsknoty za „starymi dobrymi czasami”. Jak powie ci każdy, kto dorastał w cieniu zimnej wojny i groźby wzajemnej zagłady, nie ma w nas, tych, którzy wtedy żyli, sentymentu do tamtych dni. To raczej irytacja zrodzona z bezsilnego przyglądania się, jak dziesięciolecia zdrowego rozsądku i moralnych zwycięstw liberalnej demokracji rozpadają się w proch, niszczone przez nowy typ agresywnych, oportunistycznych populistów, zdecydowanych wykorzystać spuściznę dekady trudności ekonomicznych, wywołanych w 2008 roku chciwością kilku bankierów. Wydaje się, że stoimy w obliczu ryzyka zapomnienia wszystkiego, czego nauczyliśmy się, wyciągając wnioski ze współczesnych wielkich sukcesów ludzkości i jej straszliwych błędów w przeszłości.

Moje zniecierpliwienie nie zna granic. To samo dotyczy naszego rozumienia „rzeczywistości”. Nie zliczę wszystkich przeczytanych przeze mnie książek i artykułów naukowych ani obejrzanych w telewizji filmów dokumentalnych, które zdawały się opowiadać, jak

ta czy inna teoria opisuje jakąś nową, niezwykle dziwaczną cechę rzeczywistości, nigdy przy tym nie precyzując, jakiego rodzaju rzeczywistość miałaby opisywać.

Chwileczkę. „Rodzaj rzeczywistości”? Co to ma, u licha, znaczyć?

Jeżeli weźmiesz do ręki jakiś podręcznik wprowadzający do filozofii, to istnieją spore szanse, że znajdziesz w nim rozdziały poświęcone takim tematom, jak epistemologia (nauka o wiedzy i przekonaniach), metafizyka (nauka o fundamentalnej naturze bytu i egzystencji, zawierająca ontologię i kosmologię), rozumowanie logiczne, filozofia umysłu, filozofia moralności, etyka i estetyka oraz filozofia nauki. Gdy zaś wyszukasz w indeksie hasło „rzeczywistość”, przekonasz się, że jest ono obszernie omówione w dziale *metafizyka*.

Zatem dla filozofów rzeczywistość to metafizyka (w dosłownym sensie „to, co jest po fizyce”). A jednak, zdaniem fizyków, rzeczywistość jest czymś, co opisujemy teoriami bez wątpienia *naukowymi*, takimi jak mechanika kwantowa. O co tutaj chodzi?

Otóż niektórzy znani i poważani naukowcy publicznie dyskredytowali filozofię, „która w najlepszym razie jest dla mnie przyjemnym komentarzem do historii i odkryć nauki”, jak pisze laureat Nagrody Nobla Steven Weinberg[22]. Tego rodzaju niechęć ma swoje źródło w opinii, że filozofia praktycznie w ogóle nie przyczynia się do zapoczątkowania, rozwoju i ewolucji teorii naukowej (lub czyni to tylko w niewielkim stopniu), a nawet do wyjaśnienia, co naprawdę mamy na myśli, mówiąc o „metodzie naukowej”. „Nie stawiajmy wozu przed koniem – mówi teoretyk Leonard Susskind z Uniwersytetu Stanforda. – Nauka jest koniem, który ciągnie wóz filozofii”[23]. „Oczywiście, filozofia jest dziedziną, która w ciągu dwóch tysięcy lat nie poczyniła żadnych postępów, podczas gdy nauka poszła do przodu” – powiedział astrofizyk Lawrence Krauss podczas wykładu poświęconego jego książce *Wszechświat z niczego*, będącej przykładem kiepskiej filozofii w przebraniu nauki[24].

Podobnie jak marudni członkowie Frontu Wyzwolenia Judei w *Żywocie Briana* Monty Pythona, tego rodzaju naukowcy chcą wiedzieć: „A co takiego filozofia dla nas zrobiła?”.

Wyznam, że nie rozumiem ani takich argumentów, ani leżącego u ich podłoża nastawienia. Postawmy sprawę jasno. Filozofia *nie* jest

nauką. Filozofia zmienia się i ewoluuje, ale nie jest to typ postępu, który mamy zwyczaj kojarzyć z nauką. Zapewne prawdą jest, że filozofia nie powie nam, *jak* rozwijać teorię naukową, aczkolwiek wierzę, że zawiera pewne pożyteczne wskazówki, o czym przekonamy się w następnym rozdziale. Ostatecznie temu właśnie, z założenia, ma służyć *nauka*. Jednak, jak mam nadzieję pokazać to w dalszej części rozdziału, po bliższym przyjrzeniu się odkryjemy, że praktycznie nie sposób uprawiać jakiejkolwiek nauki bez metafizyki, interpretowanej szeroko jako sfera *domysłów, których nie można udowodnić*. I chwila, w której to zaakceptujemy, jest tą, w której otworzymy drzwi dla filozofii.

Jak przekonaliśmy się w rozdziale rozpoczynającym tę książkę, mechanika kwantowa zmusza nas do stawienia czoła pewnym niewygodnym prawdom o tym, jaka wiedza o naturze rzeczywistości leży w zasięgu naszego poznania, a jaka nie. Jestem szczerze przekonany, że dla zrozumienia tego, jak *interpretować* wszystko, co mówi nam mechanika kwantowa, absolutnie zasadnicze znaczenie będzie miało docenienie kilku lekcji, jakich udziela nam filozofia[25].

Wróćmy zatem do rzeczywistości. Zaczniemy od próby odkrycia, czym – jeśli w ogóle czymś – rzeczywistość filozofa różni się od rzeczywistości naukowca.

Fani filmu *Matrix* z 1999 roku będą pamiętać scenę, w której Morfeusz instruuje Neo: „Jak definiujesz, co jest realne? Jeżeli mówisz o tym, co możesz poczuć, powąchać, spróbować lub zobaczyć, to rzeczywistość jest tylko elektrycznymi impulsami interpretowanymi przez twój mózg”[26]. Zastanów się nad tym przez chwilę, a nie będziesz mieć żadnych problemów z zaakceptowaniem ukrytej w tych słowach zasadniczej prawdy. Zdajesz się na mechanizm czuciowy swojego ciała, który dostarcza twojemu mózgowi złożony zbiór wrażeń zmysłowych (zamienionych w sygnały elektryczne). W wyniku procesów, które jeszcze nie w pełni rozumiemy, te wrażenia zostają zsyntetyzowane w twoim świadomym umyśle i tworzą zestaw spostrzeżeń oraz doświadczeń (przez niektórych filozofów nazywanych *qualia*), które wspólnie składają się na wyobrażenie otaczającego cię świata. W rezultacie

powstaje coś, co nazywasz swoją rzeczywistością. Jest ona w szczególny – i unikatowy – sposób twoja.

Przyjmujesz ją za pewnik, bo nie masz realnego wyboru. Gdybyś zaczął kwestionować wszystko, co postrzegasz, nie zdziałałbyś wiele. Czy ta róża naprawdę jest czerwona? I czym w ogóle jest „czerwień”? To pytania dotyczące twoich świadomych wrażeń, a co, jeśli cię nie ma, by czegoś doświadczać? Jeśli w lesie przewróci się drzewo i nie ma w okolicy nikogo, kto mógłby to usłyszeć, czy nadal wytwarza ono przy tym odgłos? Czy kiedy nie patrzysz na Księżyc ani o nim nie myślisz, on nadal tam jest? I tak dalej, przykłady można mnożyć.

Możesz wysunąć argument, że koniec końców jesteś wysoce inteligentną formą życia, powstałą wskutek ewolucji drogą doboru naturalnego, trwającej na Ziemi od czterech miliardów lat i regularnie przerywanej co najmniej pięcioma masowymi wyginięciami. Jaki miałoby sens, gdyby *Homo sapiens* wykształcił sobie sposób postrzegania rzeczywistości, który byłby zasadniczo odmienny czy też niespójny z tym, jaka jest ona *naprawdę*?

Niemniej jednak po kolejnej chwili milczącej refleksji być może sobie uświadomisz, że nie potrafisz wskazać takiego prawa rządzącego ewolucją, które by to gwarantowało. Jednym z czynników, które przyczyniają się do przetrwania gatunków w tej gorączkowej szamotaninie nazywanej życiem, są mutacje genetyczne, dające przewagę w grze o przetrwanie i ukierunkowujące dobór naturalny. Jeśli ci się uda, pożyjesz wystarczająco długo, żeby się rozmnożyć i przy odrobinie szczęścia przekazać tę przewagę nowym pokoleniom. Jedyne, czego możemy być pewni, to tego, że wytworzyliśmy subtelnie dostrojone umysłowe *wyobrażenie* tych aspektów rzeczywistości, które są niezbędne do zapewnienia nam przetrwania. Dobór naturalny nie wymusza na nas wytworzenia umysłu, który odzwierciedlałby rzeczywistość taką, jaka jest naprawdę.

Nieprzekonujące? Pomyśl o dowodzie, jakim jest *synestezja*; osoby doświadczające tego stanu[27] relacjonują „pomieszanie” doznań, gdy stymulacja jakiegoś zmysłu wyzwala bezwiedną reakcję ze strony jednego lub więcej innych zmysłów. Pewna dość powszechnie

występująca jego postać znana jest jako synestezja typu grafem-kolor – osoby, które jej doznają, przypisują barwę literom i liczbom: „Środa ma kolor błękitu indygowego”[28]. Łatwo to zbyć jako nieprawidłowe „okablowanie” lub „zakłócenie” w pracy mózgu, które powoduje błędną interpretację rzeczywistości, jednak wobec występowania tego zjawiska u blisko 4 procent populacji, ci, którzy są nim dotknięci, nie zawsze podzielają tę opinię. Kto może powiedzieć, czyja percepcja jest tą „właściwą”?

I zanim zapytasz, nie jest dobrze potwierdzać to, co widzisz, przez dzielenie się swoimi doświadczeniami z przyjacielem. Jeżeli nie jest on synestetykiem (a ty nie jesteś), twój przyjaciel niewątpliwie zgodzi się z tobą, że postrzega rzeczy tak samo jak ty: „Tak, ta róża jest czerwona”. Jednak nawet jeśli założymy, że umysł twojego przyjaciela działa w dużej mierze tak samo jak twój (i nie jest on, lub ona, filozoficznym zombie), oznacza to tylko tyle, że obydwa wasze umysły rozwinęły się w podobny sposób. Pewnie nauczyłeś się rozpoznawać kolor czerwony jako małe dziecko, być może z obrazków w książce, które twoi rodzice wskazywali, mówiąc głośno „czerwony”. Możesz być całkiem pewien, że twój przyjaciel zdobywał swoją wiedzę o kolorach i ich rozumienie w drodze bardzo podobnych doświadczeń. Wynika z tego, że wasze umysły zostały bardzo podobnie uwarunkowane, tworząc coś, co filozof John Searle nazwał „tłem”.

Już starożytni filozofowie greccy zauważyli istnienie problemu rzeczywistości. W swoim napisanym niemal dwa i pół tysiąca lat temu dziele zatytułowanym *Państwo* Platon zawarł alegorię, którą możemy się posłużyć, aby jeszcze raz, nieco głębiej, zbadać tę sytuację. To słynna alegoria jaskini Platona.

Głęboko w jaskini znajduje się pewna liczba więźniów, przykutych łańcuchami do ściany. Całe swoje życie spędzili w jaskini i nigdy nie doświadczyli świata na zewnątrz. Nie są nawet świadomi tego, że są więźniami.

Jest ciemno, mimo to więźniowie obserwują na przeciwległej ścianie wędrujących wzdłuż niej mężczyzn i kobiety, którzy niosą wszelkiego rodzaju naczynia, posągi i figurki zwierząt. Niektórzy rozmawiają ze sobą. W rzeczywistości daleko z tyłu jaskini cały czas

płonie ognisko i to ono wypełnia ją słabym blaskiem. Światło znajduje się poza polem widzenia i więźniowie nie zdają sobie sprawy z jego istnienia. Przesuwający się wzdłuż odległej ściany mężczyźni i kobiety, których dostrzegają więźniowie, to w rzeczywistości *cienie* przechodzących przed ogniskiem realnie istniejących osób. Rzeczywistość, której doświadczają więźniowie, utkana jest z prymitywnych *wrażeń* rzeczy – osób i obiektów – które mylnie odbierane są jako rzeczy same w sobie.

Alegoria Platona miała ilustrować jego trójstopniową teorię wiedzy. Cienie odzwierciedlają powszechne przekonania czy też popularne opinie (*doksa*) oparte tylko na wrażeniach. Same obiekty odzwierciedlają głębszą postać rozumienia, czerpanego na przykład z nauki (*episteme*, skąd wywodzi się nazwa „epistemologia"). Najwyższy stopień to *noesis* (lub „nous"), wiedza, która wykracza poza powierzchowne fakty na temat obiektów, a dotyczy ich formy i natury[29]. Alegoria służy tutaj za ilustrację faktu, że my, jako istoty ludzkie, polegamy na naszych zmysłach, biorąc dostarczane przez nie wyobrażenie rzeczywistości za dobrą monetę, jeśli nie za pewnik. W naszym codziennym życiu kwestionowanie wszystkiego, czego doświadczamy, jest zwykłą stratą czasu.

Niemniej jednak powinniśmy uznać pewną prostą prawdę. Nasza rzeczywistość utkana jest z cieni, wrażeń rzeczy i nie wiemy, w jaki sposób moglibyśmy się dowiedzieć, jak dalece wyobrażenie ukształtowane przez nasze zmysły odzwierciedla rzeczywistość taką, jaka jest naprawdę, rzeczywistość rzeczy samych w sobie.

Zatem skąd możemy mieć pewność, że rzeczywistość rzeczy samych w sobie w ogóle istnieje? Cóż, nie możemy, jednak zróbmy szybkie przewijanie kilka tysięcy lat naprzód, do roku 1781 i wielkiego filozofa Immanuela Kanta. W *Krytyce czystego rozumu* Kant dokonał rozróżnienia między tym, co nazywa *noumenami*, metafizycznymi obiektami rzeczywistości lub rzeczami samymi w sobie, które możemy sobie wyobrazić jedynie w naszych umysłach, a empirycznymi *fenomenami*, cieniami czy też rzeczami takimi, jakimi się wydają w naszej percepcji i doświadczeniu[30].

Nie zrozum przez to, że noumeny to po prostu twory bujnej wyobraźni. Potrafię sobie wyobrazić wiele zajmujących obiektów –

takich jak Gandalf, jednorożce lub Westeros – lecz oczywiste jest, że z nimi nie wiążą się żadne zjawiska; nie przejawiają się jako rzeczy, które możemy bezpośrednio postrzegać, chyba że w utworach fantastycznych.

Z bardziej praktycznego punktu widzenia możemy wskazać wiele sposobów, na jakie to, co nazywamy „elektronami", manifestuje swoją obecność w naszej empirycznej rzeczywistości. To elektrony takie, jakimi się wydają. Jednak elektron sam w sobie, niewchodzący w żadną interakcję, przez którą mógłby manifestować swoją obecność, to, poniekąd z definicji, tylko nasza imaginacja.

Kant twierdził, że nie ma sensu zaprzeczać istnieniu rzeczy samych w sobie, ponieważ muszą istnieć jakieś rzeczy, które są przyczyną zjawisk w formie percepcji zmysłowej: nie może być wrażeń bez czegoś, co je wywiera[31]. To, że nie możemy dostrzec rzeczywistości takiej, jaka jest naprawdę, nie oznacza, iż przestała istnieć. Znakomity twórca fantastyki naukowej, pisarz Philip K. Dick, z pewnością parafrazował Kanta, zauważając: „Rzeczywistość to coś takiego, co nie znika, gdy przestajesz w to wierzyć"[32].

Musimy jednak zaakceptować kompromis. W momencie, w którym radośnie wysnujemy konkluzję, że rzeczy same w sobie muszą istnieć, trzeba, chcąc nie chcąc, przyjąć, iż zasadniczo nie możemy niczego się o nich dowiedzieć. Ujmując to w kategoriach trzech stopni Platona: Kant zaprzecza, jakoby noesis była możliwa – nigdy nie posiądziemy wiedzy o formie i naturze rzeczy samych w sobie.

W poprzednim rozdziale zetknęliśmy się z kolejnym dużym brakiem ciągłości, innego typu, lecz nie mniej znaczącym. To brak ciągłości między kwantowym światem w wymiarze cząsteczkowym, atomowym i subjądrowym a klasycznym światem naszych codziennych doświadczeń. To rozdźwięk zrodzony przez zamkniętą w pudełku funkcję falową, operatorów pomiaru i kolaps funkcji falowej. Odkryjemy, że nasz niepokój dotyczący relacji między rzeczywistością a percepcją przenosi się na relację między rzeczywistością a *pomiarem*. Przekonamy się, że nie możemy dłużej zakładać, iż to, co mierzymy, na pewno odzwierciedla to, co jest naprawdę, że tu również istnieje różnica między rzeczami samymi w sobie a rzeczami takimi, jakie są mierzone.

Współczesny fizyk i filozof Bernard d'Espagnat nazwał to „zawoalowaną rzeczywistością" i skomentował: „Musimy dojść do wniosku, że realizm fizyczny jest formą »idealną«, od której pozostajemy oddaleni. W istocie porównanie ze stanem, który panował w przeszłości, sugeruje, że jesteśmy od niej znacznie bardziej oddaleni, niż dostrzegali to nasi przodkowie sto lat temu"[33].

Dlatego właśnie filozofowie uważają wszelkiego rodzaju domysły, koncepcje, dyskusje, wnikliwe analizy i rozprawy o naturze rzeczywistości rzeczy samych w sobie... za metafizykę[34].

Być może docieramy właśnie do punktu, w którym bardziej pragmatycznie nastawieni do świata czytelnicy mogą zacząć tracić cierpliwość. Filozofowie są znani ze swojej skłonności do dyskutowania, zaciemniania i mieszania w głowach, do znajdowania problemów tam, gdzie ich nie ma, i do robienia z igły wideł. Wszystkie te noumeny i fenomeny są w porządku, ale naukowcy nie chcą tracić swojego cennego czasu na roztrząsanie znaczenia słów. „Fizyka – powiedział kiedyś podczas wywiadu filozof(!) Karl Popper – jest tym!", i trzasnął z hukiem książką o blat znajdującego się przed nim stołu[35].

Nauka z pewnością jest inna. Uprawiana jest drogą skrupulatnego gromadzenia twardych, powtarzalnych i weryfikowalnych *faktów*. Naukowcy tworzą teorie, które mogą pasować do tych faktów i wyjaśnić tworzone przez nie wzorce w kategoriach pewnych, leżących u ich podstaw praw natury. Te teorie pozwalają na sformułowanie przewidywań, które można testować, odwołując się do nowych obserwacji lub eksperymentów, dostarczających nowych faktów. Czasami te nowe fakty nie pasują do teorii, wówczas albo się ją w jakiś sposób poprawia, albo odrzuca i zastępuje nową. Tak właśnie, inaczej niż w filozofii (przynajmniej według Kraussa), dokonuje się postęp w nauce.

Tyle że, jak przekonamy się w następnym rozdziale, to wcale nie jest takie proste.

W porządku, zatem nigdy nie możemy być pewni, czy rzeczywistość, którą postrzegamy lub mierzymy, odzwierciedla bądź wyobraża rzeczy same w sobie, niemniej oczywiste jest, że ta świadomość nie powstrzymuje nas przed dokonywaniem obserwacji,

prowadzeniem eksperymentów czy rozwijaniem i testowaniem teorii naukowych. Nadal możemy stwierdzać, że jeśli zrobimy *to*, stanie się *tamto*. Możemy ustalać twarde fakty na temat cieni – projekcji tego, co uważamy za rzeczywistość, czymkolwiek by była, do świata naszych zmysłów i pomiarów – i porównywać je z podobnymi faktami uzyskiwanymi przez innych. Jeżeli te fakty się zgadzają, to chyba znak, że nauczyliśmy się czegoś na temat natury rzeczywistości?

Na tym właśnie polega umowa, którą zawieramy. Filozofowie mówią nam, że rzeczywistość sama w sobie jest metafizyczna. Chociaż naukowcy nieczęsto otwarcie to przyznają, rzeczywistość, którą badają, jest w istocie *rzeczywistością empiryczną*, wydedukowaną z ich badań nad cieniami. To rzeczywistość empiryczna obserwacji, doświadczeń, pomiarów i percepcji, rzeczywistość empiryczna rzeczy takich, jakimi się wydają, i rzeczy takich, jakie są mierzone. Jak ujął to kiedyś Heisenberg: „Musimy więc pamiętać, że tym, co obserwujemy, nie jest przyroda sama w sobie, lecz przyroda, jaka nam się jawi, gdy zadajemy jej pytania we właściwy nam sposób”[36].

To jeszcze nie wszystko. Naukowcy najlepiej pracują w ramach nakreślonych przez prawa albo zasady. Potrzebują parametrów. Nawet jeśli – być może – nie będziemy w stanie zdobyć wiedzy o metafizycznej rzeczywistości samej w sobie, możemy naśladować Kanta (i Philipa K. Dicka) i *założyć*, że taka rzeczywistość musi istnieć. Nie mogą istnieć wrażenia bez czegoś, co je wywołuje. Co więcej, musi to być coś istniejącego *obiektywnie* i *niezależnie* od naszej percepcji lub możliwości wykonania pomiaru. Oczekiwalibyśmy, że cienie będą padały na ścianę jaskini niezależnie od tego, czy w jaskini są więźniowie, którzy mogliby je obserwować, czy też ich w niej nie ma.

Zgodzilibyśmy się również, że jakakolwiek ta rzeczywistość jest, wydaje się racjonalna i przewidywalna, przynajmniej do pewnego stopnia. Sprawia wrażenie spójnej logicznie. Z pewnością cienie, które rejestrujemy zmysłami i poddajemy pomiarom, nie są całkiem niezależne od powodujących je rzeczy samych w sobie, w przeciwnym razie wszystko jest dozwolone i jakakolwiek nauka

byłaby niemożliwa. Nawet jeśli, jak dowodzi Kant, nigdy nie posiądziemy wiedzy na temat rzeczy samych w sobie, możemy *założyć*, że własności i zachowanie rzucanych przez nie cieni są w jakiś sposób określone przez to, co je rzuca.

Prawda jest taka, że rzeczywistość empiryczna jest światem stosunkowo nudnym. To rzeczywistość składająca się tylko z liczb i zjawisk, rzeczywistość robienia tego i otrzymywania tamtego. Wyobraź sobie artykuł mówiący: „Zrobiliśmy to i to, co dało nam takie i takie wyniki". Koniec kropka. Liczby i zjawiska dopóty nie mają żadnego znaczenia, dopóki nie spróbujemy ich *zinterpretować*. W tym celu konstruujemy teorię, która stara się wyjaśnić to, co się dzieje, w ramach szerszego dążenia do pogłębienia naszego rozumienia. Moim zdaniem, bez uprzedniego założenia, że u podstaw wszystkich suchych doświadczeń empirycznych tkwi niezależna egzystencja racjonalnej i spójnej logicznie rzeczywistości, tworzenie wszelkich teorii naukowych jest po prostu niemożliwe.

Co usprawiedliwia takie założenie? Poważnie ryzykując, że będę się powtarzał, ponownie zacytuję Einsteina: „Nie znam lepszego słowa niż »religijne« na określenie tego przeświadczenia o racjonalnej naturze rzeczywistości i jej dostępności, w pewnym przynajmniej stopniu, dla ludzkiego rozumu"[37].

Naukowcy na ogół nie poświęcają tym założeniom zbyt wiele uwagi, ani o nich intensywnie nie myśląc, ani im się szczególnie nie przyglądając. Wielu uważa je za intuicyjnie oczywiste. Jednak zaakceptowanie tych założeń oznacza przyjęcie określonego *stanowiska filozoficznego*. To stanowisko ma nazwę – brzmi ona „realizm naukowy". Co ciekawe, ci, którzy w ogóle się nad tym nie zastanawiają, nie mogą uniknąć analogicznego zaangażowania, świadomego lub nie, zazwyczaj w alternatywne, choć pokrewne stanowisko zwane „realizmem naiwnym", które to określenie zawsze uważałem za stosunkowo pejoratywne. Podobnie jak pan Jourdain w sztuce Moliera *Mieszczanin szlachcicem*, który odkrywa, że całe życie mówił prozą, niektórzy naukowcy mogliby odkryć, że, przynajmniej do pewnego stopnia, przez całą swoją karierę naukową przyjmowali określone stanowisko filozoficzne, a więc uprawiali filozofię.

Rozmyślnie lub nie, większość naukowców jest realistami, aczkolwiek wielu z nich nie zaprząta sobie głowy wielkimi pytaniami na temat natury rzeczywistości, z przyjemnością zostawiając to filozofom. Chociaż poglądy filozoficzne Einsteina ewoluowały na wczesnym etapie jego życia, to w kwestii mechaniki kwantowej pozostał realistą[38], podobnie jak Schrödinger (i Popper). Wiele lat temu szkoliłem się jako eksperymentator i powiem, że bardzo trudno jest pracować w laboratorium i zachować zdrowie psychiczne, jeżeli do pewnego stopnia nie wierzy się w realność rzeczy, które są badane.

Zatem wbijmy w ziemię kołek z tabliczką, na której wypisany jest sąd logiczny realistów (filozofowie lubią sądy logiczne)[39]:

> ***Pierwszy Sąd Logiczny Realistów:***
> *Księżyc nadal istnieje, kiedy nikt na niego nie patrzy*
> *(ani o nim nie myśli).*

Prawdę mówiąc, zaoszczędzi nam to masę czasu. Zasadniczo chodzi o to, że rzeczywistość (cokolwiek by to było) naprawdę istnieje, co więcej, istnieje niezależnie od naszych możliwości dokonywania empirycznych obserwacji lub pomiarów. Obojętne, czy ktoś o niej myśli, czy nie, ona kontynuuje swoje istnienie. Jest *obiektywna*, nie subiektywna. Jej istnienie nie zależy ode mnie (ani od ciebie).

Ważne, by pogodzić się z tym, że jakkolwiek rozsądny wydawałby ci się Pierwszy Sąd, jest on jedynie *założeniem*. Co więcej, jest to założenie, którego nigdy nie będziemy w stanie udowodnić. Akceptacja tego oznacza przyznanie, że u samych podstaw nauki leży metafizyka.

Teraz musimy zrobić coś z faktem, że spora część nauki (i niemalże cała mechanika kwantowa) ma do czynienia z rzeczami, których nie możemy obserwować bezpośrednio, ale jedynie drogą zbierania *pośrednich* dowodów empirycznych. Mówimy tu o obiektach takich jak fotony, elektrony i kwarki. Wywołują one skutki widoczne w rzeczywistości empirycznej naszych eksperymentów – wzory interferencyjne, linie w komorze mgłowej i „dżety” cząstek

obserwowane w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN, te ostatnie zaś można prześledzić wstecz aż do zachowań kwarków i gluonów, cząstek przenoszących oddziaływania, które spajają kwarki wewnątrz protonów i neutronów. Postanowiliśmy interpretować te efekty w kategoriach „nieobserwowalnych" bytów kwantowych i przypisujemy im własności fizyczne w rodzaju masy, ładunku elektrycznego, spinu, zapachu i koloru. Następnie na podstawie przypisywanych tym nieobserwowalnym bytom własności wyjaśniamy obserwowane wyniki doświadczeń.

Umówmy się, w świetle dyskusji powyżej, że te własności opowiadają nam tylko o rzeczach takich, jakimi się wydają, czy takich, jakie są mierzone, i nie ma żadnej możliwości zdobycia wiedzy o fotonach samych w sobie czy elektronach samych w sobie i tak dalej. To jednak nie powstrzymuje nas przed zakładaniem, że rzeczy same w sobie naprawdę istnieją, niezależnie od jakichkolwiek aparatów, które są potrzebne, żeby je zmierzyć. Na przykład dostrzegamy pewne wzorce zachowania, które wyjaśniamy w kategoriach ładunku elektrycznego. Jednak ładunek elektryczny to zaledwie przejaw empiryczny jakiejś „rzeczywistej" własności, która wywołuje takie skutki. Równie dobrze mógłby to być ładunek elektryczny w takim sensie, w jakim go rozumiemy, ale prawda jest taka, że nie mamy sposobu, by się tego dowiedzieć.

Proponuję skupić się tutaj na rzeczywistości bądź bytach samych w sobie i aż do następnego rozdziału odłożyć na bok rozważania na temat ich własności. Jeden z moich ulubionych argumentów na rzecz „realizmu bytu" pochodzi od filozofa Iana Hackinga. W początkowych ustępach swojej wydanej w 1983 roku książki *Representing and Intervening* Hacking zamieszcza szczegółowy opis serii eksperymentów zaplanowanych w celu sprawdzenia, czy technicznie możliwe jest wykrycie ułamkowych ładunków elektrycznych, które są charakterystyczne dla kwarków „swobodnych" (niestety, odpowiedź brzmi „nie jest"). Podczas doświadczeń następował przepływ ładunków elektrycznych po powierzchni kul z nadprzewodzącego niobu:

> Jak więc dokonuje się zmiany ładunku na kuli z niobu? „Cóż, na tym etapie – powiedział mój przyjaciel – spryskujemy ją pozytonami, żeby zwiększyć wartość ładunku, albo elektronami, żeby go zmniejszyć". Od tej pory jestem realistą naukowym. *Jeśli o mnie chodzi, coś, czym można spryskiwać, jest realne*[40].

To, że Hacking jest realistą w odniesieniu do bytów nieobserwowalnych, nie oznacza jeszcze, iż uważa teorie naukowe na temat takich bytów za bezwzględnie „prawdziwe". W następnym rozdziale będziemy kontynuować rozważania na temat naukowego odzwierciedlenia własności i zachowań, jednak dopóki mowa o realizmie bytów niepoddających się obserwacji, dopóty nie znajduję lepszych słów niż następujące:

> ***Drugi Sąd Logiczny Realistów:***
> *Coś, czym możesz spryskiwać, jest realne.*

To również powinno zaoszczędzić nam sporo czasu.

Być może skłaniasz się teraz ku opinii, że stajemy w obliczu prostego wyboru między metafizyczną rzeczywistością filozofów a empiryczną rzeczywistością naukowców. Niektórzy naukowcy i filozofowie faktycznie twierdzili, że to takie proste, czarno-biały wybór między metafizyką i empiryzmem. Kategoryczne odrzucenie metafizyki doprowadziło arcyempirystę Ernsta Macha do konkluzji, że nie może istnieć coś takiego jak atomy. W latach dwudziestych i trzydziestych ubiegłego wieku grupa zwana Kołem Wiedeńskim, której przewodzili filozofowie Moritz Schlick, Rudolf Carnap i Otto Neurath (oraz inni), stwierdziła, że cała metafizyka nie ma sensu i jako taka powinna być odrzucona. Podjęli próbę stworzenia filozofii opartej na nauce, w której jedynym słusznym źródłem wiedzy jest doświadczenie. To *pozytywizm logiczny*, odmiana filozofii typu „zobaczyć znaczy uwierzyć", pozostającej pod bezpośrednim wpływem Macha[41].

Jednak prawda jest taka, że Mach uznał pomysł istnienia atomów za błędny i program pozytywizmu logicznego upadł[42]. W istocie niemożliwe jest wyeliminowanie z nauki całej metafizyki. Nawiasem

mówiąc, uświadamianie sobie takich rzeczy to jeden ze sposobów, w jaki możliwe jest postrzeganie postępu w filozofii. To kolejny powód, dla którego naukowcy ostatecznie, chcąc nie chcąc, uprawiają przynajmniej namiastkę filozofii, czy są tego świadomi, czy nie.

Problem pojawia się, gdy tylko próbujemy wykroczyć poza sferę dowodów empirycznych – liczb, zjawisk, robienia tego i uzyskiwania tamtego. Wykroczenie poza sferę dowodów oznacza otwarcie drzwi dla metafizyki. A to z tego prostego powodu, że niemożliwe jest zaangażowanie się w jakikolwiek sensowny dialog o tym, „dlaczego" i „jak", bez uprzedniego wyrobienia sobie pewnego pojęcia o rzeczywistości, która, jak zakładamy, leży u podstaw danych empirycznych. Obierający tę ścieżkę naukowcy nie mają innego wyjścia, jak tylko pofolgować swojemu wewnętrznemu metafizykowi.

To dosyć zgrabnie prowadzi mnie do analogii, o której wspomniałem w przedmowie. Chcąc zrozumieć, jak uprawiana jest nauka, musimy poznać i uszanować bardzo różne sposoby myślenia o rzeczywistości, jakie przyjęli naukowcy i filozofowie, oraz zachodzący między nimi niezwykle istotny związek. Próbowałem to osiągnąć, wyobrażając je sobie jako dwa rozdzielone morzem brzegi, jak pokazano na rysunku 7. Dając upust fantazji, przedstawiłem brzeg Rzeczywistości Metafizycznej jako krainę idylliczną. To miejsce ciepłe, słoneczne i gościnne, kraina piaszczystych plaż i bujnej tropikalnej roślinności. Dom wyobraźni abstrakcyjnej i absolutnej perfekcji. Tu znajdziesz koncepcje rzeczywistości takiej, jaka mogłaby być, lub rzeczywistości takiej, jaka być powinna. Koncepcje zrodzone z preferencji i wartości wyznawanych osobiście przez odwiedzających brzeg naukowców, bazujące na wszystkim, czego ich nauczono i co zdołali pojąć na temat natury rzeczywistości oraz wielu rzeczy, których istnienia mogą się tylko domyślać.

To miejsce, w którym naukowcy mogą być ludźmi – bardziej Kirkiem niż Spockiem. Tutaj wolno im wyrazić swoje emocje, uwolnić swoje pragnienia, dać upust swoim frustracjom i po prostu być sobą. Tutaj można przyjąć, że coś jest prawdą, bez dowodów, akceptować coś bezwarunkowo, tu można mieć wiarę. Niektórzy mogą poszukiwać tu Boga (co w tym przypadku oznaczałoby, że to miejsce

jest swego rodzaju niebem). Ci spośród naukowców, którzy zaprzeczają istnieniu Boga, mogą natomiast zaglądać tutaj, by nie znaleźć niczego, ponieważ wyczarowanie czegoś z niczego wyłącznie za pomocą mechanizmu fizycznego obrazuje (przynajmniej w ich opinii) ostateczny triumf rozumowania naukowego (a w rzeczywistości jedynie w inny sposób metafizycznego) nad religijnym zabobonem.

Tego rodzaju metafizyka może obejmować wielkie wizje rzeczywistości, jej przyczyn, natury i ostatecznego losu. Na ogół jednak najpewniej zaprzątają ją pewne dość prozaiczne aspekty rzeczywistości, rzeczy same w sobie i szczegóły praktyczne konieczne do zmontowania rzeczywistości w taki sposób, by się nie rozpadła.

Może ci się wydawać wątpliwe, czy naukowcy naprawdę potrzebują takiego miejsca. Dlaczego mieliby marzyć o udaniu się tam? Z pewnością wszystko, czego potrzebują, znajdują w Rzeczywistości Empirycznej? Pozwól więc, że spróbuję wyjaśnić ci na przykładzie, dlaczego naukowcy odkrywają w sobie potrzebę częstych wizyt w tym miejscu.

Jak przekonaliśmy się w rozdziale 1, na początku XX wieku fizycy, gnani potrzebą wyjaśnienia pewnych niedających się wytłumaczyć faktów, zmuszeni byli wymęczyć mechanikę kwantową z jej poprzedniczki, mechaniki klasycznej. W rezultacie nasze rozumienie takich koncepcji fizycznych jak pęd zostało dogłębnie i nieodwracalnie zmienione. *Jednak pewne koncepcje klasyczne przetrwały*.

Rysunek 7. Metafora teoretyzowania w nauce: żeglowanie Statkiem Nauki po Morzu Odwzorowania, między brzegami Rzeczywistości Metafizycznej i Empirycznej

Otóż mechanika klasyczna, którą odziedziczyliśmy po Newtonie, wymaga istnienia *absolutnej* przestrzeni i czasu. To problem, ponieważ przestrzeń absolutna, gdyby istniała, tworzyłaby swego rodzaju osobliwy kontener, prawdopodobnie o nieskończonych wymiarach, wewnątrz którego jakiś tajemniczy kosmiczny metronom odmierzałby czas absolutny. Sugerowałoby to istnienie punktu obserwacyjnego, z którego możliwe byłoby spoglądanie w dół na cały materialny wszechświat, oglądanie wszelkiego stworzenia z „boskiej perspektywy". Arcyempirysta Mach odrzucił również to pojęcie, a Einstein zapewne pozbył się go (raz na zawsze), publikując w 1915 roku swoją ogólną teorię względności, w której przestrzeń i czas wyłaniają się jako zmienne dynamiczne.

Absolutna przestrzeń i czas lub, poprawniej, *czasoprzestrzeń* absolutna to konstrukcja metafizyczna. I oto wciąż tutaj jest, przywleczona bez większych zmian z mechaniki klasycznej, stanowiąc tło, na którym wyobrażamy sobie zdarzenia mechaniki kwantowej. Świadomie lub nie, każdy parający się mechaniką kwantową naukowiec akceptuje pogląd, że rzeczywistość składa się z czasoprzestrzeni absolutnej. Akceptuje jej istnienie bez jakiegokolwiek dowodu empirycznego, jako prawdę (lub przynajmniej rzecz aprobowaną), która nie wymaga dowodu.

Wzdłuż naszych morskich brzegów znajdziesz też rozrzucone abstrakcyjne koncepcje metafizyczne, konieczne do naoliwienia matematycznej maszynerii nauki. To obiekty w rodzaju okręgu doskonałego i sfery doskonałej, nieskończenie małego punktu, nieskończenie małego kąta, nieskończonej linii prostej, granicy w nieskończoności i wielu innych. Te koncepcje nie istnieją w Rzeczywistości Empirycznej, a jednak bez nich trudno byłoby nam uprawiać jakąkolwiek naukę opartą na matematyce[43].

Z punktu widzenia naukowców, którzy spędzili tu choćby trochę czasu, wszystko to zbija się w zbiór *metafizycznych prekoncepcji*, stanowiący podsumowanie sposobu, w jaki naukowcy myślą o rzeczywistości i rzeczach, które, jak sądzą, powinna zawierać. Zbiór ten obejmuje prekoncepcje, które mogą się opierać na takich pojęciach abstrakcyjnych, jak piękno, symetria, elegancja czy prostota. Są one źródłem przekonań, że wyjaśnienia teoretyczne powinny być „naturalne". Albo że rzeczywistość musi być deterministyczna, a w ślad za przyczyną nieuchronnie następuje skutek. Albo że istnieją pewne niepodważalne „prawa natury" (na przykład zasady zachowania), które zawsze muszą być spełnione. Albo że czasoprzestrzeń musi być absolutna[44].

Po drugiej stronie morza znajdziemy Rzeczywistość Empiryczną. To rzeczywistość naszych codziennych doświadczeń, zatem powinienem z góry przeprosić, jeśli mój opis wyda się nieznośnie posępny. Przede wszystkim chciałbym podkreślić kontrast między Rzeczywistością Empiryczną a piaszczystą, zalesioną, urzekającą powabem Rzeczywistością Metafizyczną, cały czas mając w pamięci przestrogę, że nauka to okrutna kochanka – Humphry Davy ostrzegł tymi

słowami podatnego na wpływy młodego Michaela Faradaya, który 1 marca 1813 roku został właśnie nowo zatrudnionym pracownikiem Instytutu Królewskiego w Londynie[45].

Zatem brzegi Rzeczywistości Empirycznej są skaliste i kruche, dręczone porywistymi wiatrami oraz chłostane wzburzonymi falami. To niegościnny dom twardych, jeśli nie wręcz brutalnych faktów empirycznych, liczb i zjawisk, robienia tego i uzyskiwania tamtego. Oczywiście to tutaj odkrywamy, jaka *naprawdę* jawi się natura. To tutaj (podobno według Benjamina Franklina) bandy brutalnych faktów znane są z zabijania pięknych teorii lub, jak twierdzi Thomas Huxley, jesteśmy świadkami wielkiej tragedii nauki – mordowania pięknych hipotez przez brzydkie fakty[46]. To miejsce, w którym naukowcy muszą zapomnieć o swoich emocjach i preferencjach i uprawiać zimny, wyrachowany racjonalizm – zdecydowanie muszą być bardziej jak Spock niż Kirk.

Niech ci się jednak nie wydaje, że nie ma tu miejsca na metafizykę. Jesteśmy zmuszeni zaakceptować fakt, że żadna obserwacja lub doświadczenie nie byłyby możliwe, gdybyśmy nie mieli jakiejkolwiek idei na temat tego, na co patrzymy lub co poddajemy eksperymentom. Oczywiście nie oznacza to, że nigdy nie możemy odkryć czegoś nowego, chodzi jedynie o to, że niemożliwe jest przeprowadzenie obserwacji lub pomiaru bez umieszczenia ich w kontekście jakiejś teorii, choć w rezultacie ta teoria może się zmienić lub ustąpić miejsca innej.

Francuski fizyk i filozof Pierre Duhem zasugerował kiedyś, żebyśmy weszli do laboratorium i poprosili naukowca, przeprowadzającego podstawowe doświadczenia nad przewodnictwem elektrycznym, by wyjaśnił nam, co robi:

> Czy odpowie: „Badam oscylacje tego kawałka żelaza z umocowanym do niego zwierciadłem?”. Nie, powie ci, że mierzy opór elektryczny cewki. Jeżeli się zdziwisz i zapytasz go, co znaczą te słowa i w jaki sposób wiążą się ze zjawiskiem, które obserwował i które ty również w tym samym czasie obserwowałeś, odrzeknie, że odpowiedź na

twoje pytanie wymagałaby długich wyjaśnień, i zaleci zapoznanie się z kursem omawiającym elektryczność[47].

Fakty empiryczne nigdy nie są neutralne wobec teorii, nigdy nie są wolne od skażenia taką czy inną teorią. Gdy warstwa po warstwie konstruujemy teorię wyjaśniającą dane zjawiska, koncepcje naszej teorii przenikają do języka, którym te zjawiska opisujemy. Fakty i teoria stają się beznadziejnie splątane: to, co obserwujemy w Rzeczywistości Empirycznej, do pewnego stopnia zależy od tego, jak na nią patrzymy.

Nic dziwnego, że pozytywizm logiczny zawiódł.

Brzegi Rzeczywistości Metafizycznej i Empirycznej są rozdzielone morzem. Jak wyjaśniłem wcześniej, jeżeli mamy nadać sens faktom empirycznym, znajdując wyjaśnienia, które pogłębią nasze rozumienie, musimy znaleźć sposób na pogodzenie ze sobą faktów i prekoncepcji. Musimy wytworzyć między nimi pewne napięcie. Dlatego żeglujemy naszym Statkiem Nauki, zabierając z sobą wszystkie nasze metafizyczne prekoncepcje i wykorzystując wiedzę o faktach empirycznych do stworzenia użytecznego *odwzorowania* rzeczywistości, które nazywamy teorią naukową. Celem owej żeglugi jest znalezienie sposobu na ulokowanie naszych prekoncepcji i faktów empirycznych w jednej strukturze, zwykle (choć nie wyłącznie) matematycznej.

Istnieje wiele różnych tras, którymi można żeglować po morzu, co sugeruje, że faktycznie da się rozwinąć wiele różnych teorii, z których każda zawiera własną mieszaninę prekoncepcji i każda pozwala na doskonałe wyjaśnienie danych empirycznych. Filozofowie nauki nazywają to *niedookreśleniem teorii przez dane empiryczne*. To nieco rozczarowujące dla kogoś, kto sądzi, że nauka powinna zapewniać opis rzeczywistości, który jest jednoznacznie „prawdziwy”, niekwestionowany i ustalony po wsze czasy.

I to by było na tyle. Filozofowie są zadowoleni, rozmyślając i dyskutując o Rzeczywistości Metafizycznej, jakim celom może ona służyć, czy ma jakiś realny sens i znaczenie. Są filozofami i nie zaprzątają sobie głowy żeglowaniem na pokładzie Statku Nauki[48]. Naukowcy, wprost przeciwnie, właśnie tym się zajmują. Statek pływa

tam i z powrotem po Morzu Odzwierciedlenia, umożliwiając na jednym brzegu cyzelowanie metafizycznych prekoncepcji, na drugim zbieranie nie całkiem neutralnych faktów empirycznych w ramach podróży w nadziei na znalezienie udanej teorii.

Zobaczmy więc, jak to może działać.

22 Steven Weinberg, *Sen o teorii ostatecznej*, przeł. Piotr Amsterdamski, Zysk i -S-ka, Poznań 1991.

23 Lee Smolin i Leonard Susskind, *Smolin vs. Susskind: The Anthropic Principle*, „The Edge", 18 sierpnia 2004 r., http://www.edge.org/3rd_culture/smolin_susskind04/smolin_susskind.html (dostęp: 4.01.2021).

24 Wystąpienie Lawrence'a Kraussa podczas 38. Narodowego Konwentu Amerykańskich Ateistów, 25 marca 2012 r., https://www.youtube.com/watch?v=u9Fi-BqS_Fw (dostęp: 4.01.2021). Powyższy komentarz pojawia się około 2.33.

25 Tak czy siak, jak dowodził teoretyk Carlo Rovelli: „Ci, którzy podważają użyteczność filozofii, sami uprawiają filozofię".

26 Larry i Andy Wachowski, *The Matrix: The Shooting Script*, Newmarket Press, Nowy Jork 2001, s. 38.

27 Unikam sformułowania „ci, którzy na niego cierpią", ponieważ niektórzy synestetycy uważają się za wyróżnionych szczególnym darem.

28 Richard E. Cytowic i David M. Eagleman, *Wednesday is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia*, MIT Press, Cambridge, MA 2009.

29 Podziękowania dla Micheli Massimi za wyłożenie mi tego w osobistej rozmowie, którą odbyliśmy 20 marca 2019 roku.

30 Powinienem wspomnieć, że utożsamianie noumenów z kantowskimi „rzeczami samymi w sobie" (*Ding an sich*) jest nieco kontrowersyjne i do dziś dyskutowane w środowisku filozofów. Jeżeli szukasz dobrego omówienia, zob. Sebastian Gardner, *Kant and the Critique of Pure Reason*, Routledge, Londyn 1999, s. 200–201.

31 *Krytyka* Kanta jest trudna w odbiorze i oczywiste jest, że jego pojmowanie fenomenów nie jest tak proste i jednoznaczne, jak tutaj sugerowałem. Fenomeny nie „wywodzą się" od noumenów w takim samym sensie, w jakim cienie w jaskini Platona są rzucane przez znajdujące się tam obiekty. Nasze zmysły nie myślą, a umysł ludzki niczego nie zdoła się domyślić, o ile nie ma dostępu do percepcji zmysłowej. Chcąc zdobyć wiedzę, musimy połączyć jedno z drugim. Zatem fenomeny to „konceptualizowane wrażenia", ukształtowane przez styl działania naszych umysłów, w tym intuicyjne pojmowanie czasu i przestrzeni. Kant dowodził, że z uwagi na „syntetyczną jedność myśli" tego rodzaju wrażenia i tak są obiektywne.

32 Philip K. Dick, esej z 1978 roku *How to Build a Universe that Doesn't Fall Apart Two Days Later*, zawarty w antologii *I Hope I Shall Arrive Soon*, pod redakcją Marka Hursta i Paula Williamsa, Grafton Books, Londyn 1988. Powyższy cytat pojawia się na s. 10.

33 Bernard d'Espagnat, *Reality and the Physicist: Knowledge, Duration and the Quantum World*, Cambridge University Press, Cambridge 1989, s. 115.

34 Przynajmniej od czasów Kanta, a możliwe, że jeszcze od Platona. Oczywiście to nie powstrzymuje niektórych współczesnych filozofów (a także, jak przekonamy się w dalszej części książki, niektórych fizyków teoretyków) przed dowodzeniem, że czysta metafizyka mimo wszystko może w jakiś sposób generować obiektywną wiedzę.

35 Cyt. za: John Horgan, *The End of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Abacus, Londyn 1998, s. 35.

36 Werner Heisenberg, *Fizyka a filozofia*, przeł. Stefan Amsterdamski, Książka i Wiedza, Warszawa 1965.

37 Cyt. za: Maurice Solovine, *Albert Einstein: Lettres à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, Paryż 1956. Cytat ukazał się powtórnie w: Arthur Fine, op. cit., s. 110 (tu cyt. za: Walter Isaacson, *Einstein. Jego życie, jego wszechświat*, przeł. Jarosław Skowroński, Wydawnictwo W.A.B., Warszawa 2010 – przyp. red.).

38 Einstein przeczytał *Krytykę czystego rozumu* Kanta w wieku 13 lat i przez jakiś czas Kant był jego ulubionym filozofem.

39 W dalszej części książki będę często odwoływał się do tych sądów, zatem w celu zaoszczędzenia czytelnikom trudu powracania tutaj, żeby przypomnieć sobie ich brzmienie, zebrałem je wszystkie w poręcznym dodatku na końcu.

40 Ian Hacking, *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press, Cambridge 1983, s. 23.

41 Muszę wyznać, że po raz pierwszy usłyszałem o pozytywizmie logicznym w niesławnym skeczu o australijskich Bruce'ach, który pojawił się w odcinku *Latającego cyrku Monty Pythona* z listopada 1970 roku (miałem wtedy 13 lat). Rzecz dzieje się na Wydziale Filozofii Uniwersytetu Woolamaloo, na którym każdy wykładowca nazywa się Bruce. „I tak, Bruce wykłada filozofię klasyczną, Bruce wykłada heglizm, a ten tutaj Bruce wykłada pozytywizm logiczny oraz jest odpowiedzialny za środek odkażający owce" (za: *Monty Python's Flying Circus: Just the Words*, tom 1, Mandarin Paperbacks, Londyn 1990, s. 295).

42 Einstein na zawsze pozostał wdzięczny Machowi za jego podejście do fizyki, ale nie za agresywnie empirystyczne podejście do filozofii. Jak sam kiedyś

skomentował: „Mach […] był dobrym mechanikiem, ale pożałowania godnym filozofem” (cyt. za: Abraham Pais, op. cit., s. 286).

43 Jeżeli szukasz znacznie obszerniejszego omówienia tego aspektu zastosowania matematyki w nauce, gorąco polecam książkę Giovanniego Vignale, *The Beautiful Invisible: Creativity, Imagination, and Theoretical Physics*, Oxford University Press, Oksford 2011.

44 Przykład wywodu naukowego popierającego akceptację czasoprzestrzeni absolutnej znajdziesz w książce Briana Greene’a, *Struktura kosmosu. Przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005 (autor pisze: „czasoprzestrzeń jest czymś”).

45 Zob. http://www.rigb.org/blog/2013/march/faraday-appointment (dostęp 4.01.2021).

46 Thomas Huxley, *Biogenesis and Abiogenesis*, mowa z okazji objęcia stanowiska prezesa Brytyjskiego Stowarzyszenia Popierania Rozwoju Nauki w 1870 roku, w: *Collected Essays: Discourses Biological and Geological*, tom 8, s. 229. Zob. https://mathcs.clarku.edu/huxley/CE8/B-Ab.html (dostęp 4.01.2021).

47 Pierre Duhem, *The Aim and Structure of Physical Theory*, przekład angielski drugiego wydania francuskiego z 1914 roku autorstwa Philipa P. Wienera, Princeton University Press, Princeton 1954, s. 145.

48 Aczkolwiek filozofowie nauki będą mieli coś do powiedzenia o projekcie i budowie statku, o tym, jak można nim dowodzić, o znajdujących się na jego wyposażeniu instrumentach i mapach morskich, a także o naturze jego podróży tam i z powrotem.

ROZDZIAŁ 3

Żeglując po morzu odwzorowania

Jak teorie naukowe działają (a czasami nie)

Wszyscy mamy tendencję do dość swobodnego posługiwania się słowem „teoria". Mam własną teorię na temat tego, dlaczego w referendum, które odbyło się w czerwcu 2016 roku, Brytyjczycy niewielką różnicą zagłosowali za opuszczeniem Unii Europejskiej. Mam też teorię dotyczącą oburzającego sukcesu, jaki nieco później tego samego roku odniósł w wyścigu do Białego Domu Donald Trump, zostając 45. prezydentem Stanów Zjednoczonych. Możemy się zgodzić, że nie ma znaczenia, jak bardzo logiczne byłyby to wywody, są to „tylko teorie".

Naukowe teorie o uznanej skuteczności wnoszą znacznie więcej. Zdaje się, że mówią nam coś niezwykle ważnego na temat tego, jak funkcjonuje natura. Teorie takie jak mechanika Newtona, teoria ewolucji Darwina, szczególna i ogólna teoria względności oraz, oczywiście, mechanika kwantowa są powszechnie akceptowane jako warunkowo „prawdziwe" odwzorowania rzeczywistości i tworzą podstawy, będące punktem wyjścia do poszukiwań odpowiedzi na pytania, jak powstał Wszechświat i jak znaleźliśmy się w nim my, istoty zdolne do snucia teorii na jego temat. Wiele z tego, co przyjmujemy jako coś oczywistego w naszej wieloaspektowej, naukowo-technicznej kulturze świata Zachodu, zależy

od niezawodności zastosowań licznych teorii naukowych. Mamy pełne prawo wierzyć w ich słuszność.

W artykule opublikowanym niedawno w sieciowym wydaniu „New York Timesa" biolog komórkowy Kenneth R. Miller tłumaczył, że teoria naukowa „nie znaczy tyle co przeczucie lub domysł. Teoria to cały system objaśnień, który splata ze sobą dużą grupę faktów. Nie tylko objaśnia te fakty, lecz także przewiduje, co powinniśmy znaleźć w wyniku innych obserwacji i eksperymentów"[49].

Wszystko to brzmi świetnie, ale *jak* to się dzieje? Skąd bierze się teoria naukowa i jak kształtowana jest przez konfrontację metafizycznych prekoncepcji z empirycznymi faktami? Jak zyskuje akceptację i zaufanie społeczności akademickiej? I, co najważniejsze w świetle naszych potrzeb w tej książce, jak powinniśmy *interpretować* przesłanie niesione przez teorię?

Innymi słowy, z czym tak naprawdę wiąże się żeglowanie Statkiem Nauki po wodach Morza Odwzorowania?

W pierwszym odruchu zechcemy sięgnąć do konwencjonalnego rozumienia czegoś, co ogólnie nazywane jest „metodą naukową". Można pomyśleć, że naukowcy zaczynają od zebrania dużej liczby danych empirycznych, a potem szukają w nich pewnych prawidłowości. Prawidłowości mogą sugerować możliwość, że tuż pod powierzchnią suchych danych istnieje związek przyczynowo-skutkowy, a może nawet prawo natury, które rządzi obserwowanymi zjawiskami.

Zgodnie z naszą wcześniejszą metaforą naukowcy uzbrajają się w bagaż danych empirycznych i kierują statek ku brzegom Rzeczywistości Metafizycznej. Tutaj wynajdują dla siebie te prekoncepcje na temat rzeczywistości, które mają znaczenie w kontekście przetwarzanych danych, być może obejmujące znane pojęcia, takie jak przestrzeń i czas, oraz znajome (aczkolwiek niewidzialne) byty, takie jak fotony lub elektrony, i szukają tego, co już wiemy o ich zachowaniu i własnościach.

Jeżeli w danych naukowych pojawią się prawidłowości, naukowcy będą zazwyczaj wykorzystywać matematykę w celu nadania prekoncepcjom formalnej struktury teorii, która będzie obejmować przestrzeń i czas, masę i energię, może jakieś własności, w tym

ładunek, spin, zapach lub kolor. Jeśli teoria ma być warta dalszego sprawdzania, nowa struktura będzie dostarczać naukowcom potrzebnych im powiązań. Teoria powie, że kiedy robimy *to*, dostajemy prawidłowość i jest to spójne z tym, co można zaobserwować. Potem naukowcy idą dalej. Ufając, że struktura jest wiarygodna, obmyślają, że kiedy zamiast tego zdecydujemy się zrobić *tamto*, wówczas powinno się stać coś, czego do tej pory nikt nie zaobserwował (albo nawet nie pomyślał, żeby tego szukać). Mając te przemyślenia, naukowcy płyną z powrotem przez Morze ku brzegom Rzeczywistości Empirycznej, aby przeprowadzić więcej obserwacji lub doświadczeń. Jeśli rzeczywiście uda im się zaobserwować to, co było przewidywane, teoria zyskuje większą wiarygodność i akceptację.

Taką wersję metody naukowej, opartej na zasadzie indukcji, przypisuje się zwykle Francisowi Baconowi, który po wybitnej karierze (naznaczonej również publicznym upokorzeniem) zmarł w wyniku zapalenia płuc, jakiego nabawił się podczas próby zakonserwowania kurczaka przez faszerowanie go śniegiem. Owszem, możemy czuć się dość dobrze z tą wersją metody naukowej, niepodważanej przez kilkaset lat, powinniśmy jednak chyba zgodzić się ze stwierdzeniem, że właściwie nauka wcale tak nie funkcjonuje.

Jeśli wieczne, nieodwołalne prawa natury miałyby być budowane na drodze wnioskowania indukcyjnego, wyprowadzonego lub odpowiednio modyfikowanego na podstawie eksperymentów lub obserwacji, wówczas – jak twierdzili filozofowie na początku XX wieku – musimy pogodzić się z faktem, że te prawa *nigdy nie mogą być pewne*.

Załóżmy, że realizujemy długą serię obserwacji kruków na całym świecie. Udało nam się stwierdzić, że wszystkie kruki są czarne. Wykorzystujemy indukcję do uogólnienia tej prawidłowości do postaci „prawa czarnych kruków”[50]. Naprowadzi nas ono na myśl, którą przekujemy w sformułowanie przewidywania, że następny kruk, jakiego uda nam się zaobserwować, również powinien być czarny.

Jednak musimy przyznać, że niezależnie od tego, jak wiele obserwacji wykonamy, zawsze będzie istnieć *możliwość*, iż zaobserwujemy wyjątek, kruka w innym kolorze, co byłoby sprzeczne ze sformułowanym prawem i wymagałoby albo porzucenia teorii, albo zrewidowania jej treści. Prawdopodobieństwo znalezienia kruka, który nie jest czarny, może wydawać się niezwykle małe, ale nigdy nie można zredukować go do zera, tak więc nigdy nie będziemy mieli pewności, że prawo czarnego kruka zostanie podtrzymane przez wszystkie przyszłe obserwacje. Słuszność tego wniosku potwierdzają losy europejskich odkrywców, którzy mogliby sformułować podobne „prawo białych łabędzi" i byłoby ono poprawne do chwili, w której na rzekach i jeziorach Australii i Nowej Zelandii zaobserwowaliby *czarne* łabędzie (*Cygnus atratus*).

Filozof Bertrand Russell ujął to w taki sposób: „Człowiek, który karmił kurczaka co dzień, przez całe jego życie, w końcu zamiast tego skręca mu kark, dowodząc zarazem, że kurczakowi przydałby się bardziej wyrafinowany pogląd na jednostajność natury"[51].

Karl Popper twierdził, że problemy te są nierozwiązywalne, zdecydował się więc całkowicie odrzucić indukcję jako podstawę, na której powinno się budować metodę naukową. W dwóch kluczowych książkach, *Logika odkrycia naukowego* (opublikowanej po raz pierwszy w języku niemieckim w 1934 roku) i *Droga do wiedzy: domysły i refutacje* (opublikowanej w 1963 roku), formułuje pogląd, iż postęp w nauce następuje dzięki stawianiu twórczych hipotez, z których drogą *dedukcji* wyprowadzane są skutki empiryczne. Świadomi istnienia poważnych problemów albo luk w naszym rozumieniu natury naukowcy zaczynają nie od bogatych zasobów danych eksperymentalnych, lecz od wizyty na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej. Tu dochodzą do pewnych śmiałych (czasem obrazoburczych) pomysłów na temat tego, jaka *może być* natura, a w drodze powrotnej przez Morze Odwzorowania formułują wnioski. Efektem tych działań jest formalna teoria.

Co się dzieje, gdy docieramy do brzegów Rzeczywistości Empirycznej? Odpowiedź jest prosta: teoria poddawana jest sprawdzeniu. Konfrontuje się ją z twardymi, brutalnymi i niewybaczającymi błędu faktami. Jeżeli nie ma danych, choćby

jednego izolowanego przypadku (takiego jak zaobserwowanie jednego czarnego łabędzia, gdy falsyfikujemy „prawo białych łabędzi"), sprzecznego z teorią, wówczas, według Poppera, teoria pozostaje obowiązującą i użyteczną teorią naukową.

Możemy pójść odrobinę dalej niż Popper i zasugerować, że jeśli test przeprowadzany jest na podstawie istniejących danych, empirycznych faktów, które są już znane, to teoria zyska ostrożną akceptację, pod warunkiem iż stanowi *lepsze objaśnienie* tych faktów niż jakakolwiek dostępna alternatywa. Teoria może być nie tylko ostrożnie akceptowana, ale wręcz szeroko przyjmowana, gdy formułuje *przewidywania*, które można sprawdzić, a nowe obserwacje i eksperymenty treść tych przewidywań rzeczywiście potwierdzają[52].

Szczerze wątpię, aby którykolwiek z czynnych zawodowo naukowców chciał polemizować z tymi stwierdzeniami. Mogę podać wiele, bardzo wiele przykładów z historii nauki, które pokazują, że mniej więcej właśnie tak się to odbywa. Nie piszę jednak książki o historii nauki, toteż ograniczę się tylko do jednego, za to bardzo adekwatnego.

W rozdziale 1 przekonaliśmy się, że prawdziwym rewolucjonistą kwantowym był Einstein, który w 1905 roku, w swoim „cudownym roku", opublikował hipotezę kwantów światła. Warto zauważyć, że Einstein nie wywiódł tej hipotezy drogą rozumowania indukcyjnego z żadnych dostępnych danych. Po prostu uświadomił sobie, że problem tkwi w tym, jak nauka podchodzi do rozumienia materii – odwołując się do atomów i cząsteczek – podczas gdy promieniowanie elektromagnetyczne opisywane jest wyłącznie w kontekście ciągłych fal. Dominujący opis naukowy materii i światła nie pasował do metafizycznych prekoncepcji Einsteina na temat funkcjonowania natury. W trakcie pobytu na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej przyszło mu do głowy, że sformułowane przez Plancka wnioski powinny być interpretowane w ten sposób, iż samo światło złożone jest z dyskretnych kwantów.

Potem Einstein przepłynął Morze, przedstawiając kwanty światła w teorii, która przewidywała pewne eksperymentalne wyniki dla zjawiska fotoelektrycznego. Reszta, jak mawiają, jest historią.

Hipoteza kwantów światła przeszła test, ale jak widzieliśmy, wciąż była uważana za kontrowersyjną (naukowcy potrafią być bardzo uparci). Zaledwie kilka lat po doświadczalnym zbadaniu zjawiska fotoelektrycznego Arthur Compton i Peter Debye wykazali, że światło może zostać „odbite" od elektronów, co więcej, można przewidywać zmianę częstotliwości odbitego światła (a więc również jego energii). Eksperymenty te dowiodły, że światło rzeczywiście składa się z cząstek, które poruszają się jak małe pociski. Stopniowo kwanty światła stawały się coraz mniej kontrowersyjne i bardziej możliwe do przyjęcia.

Pogląd Poppera na naukę znany jest jako metoda „hipotetyczno-dedukcyjna". Jest to nieco niezgrabna nazwa, ale zasadniczo oznacza ona tyle, że naukowcy czerpią z pełnego zasobu własnych prekoncepcji metafizycznych w celu sformułowania hipotezy (albo „domysłu") na temat tego, jak funkcjonuje natura, aby potem drogą dedukcji opracować formalną teorię, która mówi, jakich wyników empirycznych można się spodziewać w przypadku przeprowadzenia obserwacji lub eksperymentów. Nauka robi dalej swoje, konfrontując teorię z faktami, gdy statek płynie między brzegami. Nie jest to podróż w jedną stronę – statek wykonuje wiele rejsów tam i z powrotem, zatem te istotne prekoncepcje metafizyczne, które przetrwają próbę, mocno wrastają w teorię (i, jak się przekonaliśmy, w empiryczne obserwacje również) i są z nią nierozerwalnie łączone. W ten sposób istotne elementy metafizyczne są „naturalizowane" lub „asymilowane", znajdując uzasadnienie dzięki sukcesowi powstałej teorii[53].

Warto wspomnieć, że wszystko to, prekoncepcje, dane i sam statek, uwarunkowane jest przez kulturowy i historyczny kontekst albo punkt widzenia. W opublikowanych w 1687 roku *Matematycznych zasadach filozofii przyrody* Newtona są fragmenty, które odnoszą się do roli Boga w utrzymywaniu odległości między gwiazdami, metafizycznej prekoncepcji, która w dzisiejszych czasach raziłaby w tekstach naukowych. „Podróże zawsze są związane z jakąś perspektywą – powiedziała mi współczesna filozof Michela Massimi w trakcie rozmowy na temat mojej metafory. – Płyniemy naszym statkiem, wykorzystując tylko te instrumenty (kompas

i cokolwiek innego), którymi możemy dysponować dzięki aktualnej technologii, obowiązującym teoriom i zasobom eksperymentalnym. Każdy rejs tam i z powrotem pomiędzy brzegami Rzeczywistości Empirycznej i metafizycznymi presumpcjami jest więc ukierunkowywany i napędzany przez to, kim jesteśmy, a co najważniejsze, przez historię naszych osiągnięć naukowych”[54]. Porównajmy siedemnastowieczny wielki żaglowiec ze współczesnym transatlantykiem.

Zasadniczo nie ma żadnych ograniczeń odnośnie do natury hipotez, które naukowcy mogą obmyślić w trakcie częstych wizyt na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej. Co więc, moglibyście spytać, odróżnia naukę od jakichkolwiek innych nieokiełznanych spekulacji? Jeżeli wyrażę pogląd, że jakaś tajemnicza siła natury, zależna od znaku zodiaku, rządzi naszym codziennym życiem, to z pewnością wszyscy się zgodzimy, że nie jest to pogląd naukowy? A jeśli postawię tezę, iż *similia similibus curentur* – podobieństwa leczą podobne – i będę twierdził, że po rozcieńczeniu o czynnik 10^{12} (albo o czynnik 10^{60}) substancje wywołujące u ludzi choroby będą służyć za lekarstwo na te przypadłości? Czy to nauka? A może receptura na kolejne cudowne panaceum? A jeśli sięgnę po ostateczną prekoncepcję metafizyczną i wygłoszę tezę, iż za pojawieniem się wszelkiego życia na Ziemi stoi Bóg, a wszystko to, co błędnie uważamy za wynik ewolucji, jest w rzeczywistości wielkim boskim planem?

Moglibyśmy instynktownie odrzucić astrologię, homeopatię i inteligentny projekt jako przejawy pseudonauki w najlepszym razie. Ale dlaczego? W końcu wszystkie te idee obejmują głoszenie hipotez opartych na metafizyce, z której dedukowane są pewne teoretyczne zasady, niewątpliwie formułowane są też przewidywania, które można weryfikować doświadczalnie. Natychmiast dostrzegamy, że ze względu na to, jak fundamentalną rolę w budowaniu teorii naukowej odgrywa metafizyka, potrzebujemy czegoś więcej, aby nakreślić linię oddzielającą teorie postrzegane przez nas jako naukowe od pseudonauki lub czystej metafizyki. Potrzebujemy *kryterium demarkacyjnego*.

Neopozytywiści proponowali, aby temu celowi służyła „weryfikacja”. Jeżeli teorię zasadniczo da się zweryfikować przez obserwacje lub

eksperymenty, wówczas można uważać ją za naukową. Jednak zasada indukcji również zajmowała w programie pozytywistów poczesne miejsce i po jej odrzuceniu Popper nie miał wyboru i musiał odrzucić także weryfikację. Z punktu widzenia logiki jeśli indukcja nie daje gwarancji co do jednostajności natury (o czym może zaświadczyć kurczak Russella), to ciągła weryfikacja takiej gwarancji też nie daje. Teorie mogą przechodzić testy weryfikujące, aż któregoś dnia kolejnego testu nie przejdą.

Jak zobaczyliśmy wcześniej, Popper twierdził, że tym, co odróżnia teorię naukową od pseudonauki lub czystej metafizyki, jest zdolność do jej *falsyfikowania* na podstawie danych empirycznych. Mówiąc inaczej, teoria jest naukowa, jeśli jest *podatna na udowodnienie jej fałszywości*.

Takie przesunięcie akcentów jest dość subtelne, ale bardzo skuteczne. Astrologia formułuje przewidywania, ale celowo są one tak ogólne, że można je interpretować na wiele sposobów. Popper napisał: „Astrologowie […] aby uniknąć falsyfikacji, rozmyślnie formułowali swe przepowiednie tak, by były one niesprawdzalne. Jest to typowy wybieg wróżbitów”[55]. Jeżeli przewidywania takie zostaną skonfrontowane z materiałem dowodowym zagrażającym falsyfikacją, astrolog może po prostu dokonać ponownej interpretacji przewidywań, wobec czego nie ma to nic wspólnego z nauką. Możemy krytykować homeopatię na wiele sposobów i odrzucać ją jako pseudonaukę, ponieważ słabo albo wcale nie jest zakorzeniona w tradycji naszej zachodniej medycyny, opartej na naukowych podstawach – jako teoria nie wytrzymuje szczegółowej analizy. Nawet jeśli bralibyśmy ją za dobrą monetę, musielibyśmy przyznać, że wszystkie testy wypadają na jej niekorzyść, nie ma bowiem ani jednej próby klinicznej, która wykazałaby, że skuteczność homeopatii przewyższa efekt placebo. Ludzie uparcie przekonujący o jej skuteczności nie uprawiają nauki.

Nieważne też, jak bardzo chcielibyśmy wierzyć w to, że wszelkie przejawy życia na Ziemi są częścią boskiego projektu, musimy pogodzić się z faktem, iż sam inteligentny projekt nie formułuje żadnych możliwych do sprawdzenia przewidywań. Jest to po prostu koncepcja alternatywna wobec teorii ewolucji, mająca na celu

objaśnić przyczynę niewiarygodnej złożoności życia na Ziemi. Inteligentny projekt nie jest falsyfikowalny, na tej samej zasadzie nikt nie może udowodnić istnienia lub nieistnienia Boga. Inteligentny projekt nie jest teorią naukową, jest po prostu przesycony metafizyczną zawartością.

Aczkolwiek to jeszcze nie wszystko. Być może nasze pojmowanie nauki zawsze było zbyt piękne, aby było prawdziwe. Historia uczy nas, że nauka jest znacznie bardziej nieuporządkowana i proste kryterium linii demarkacyjnej mówi mniej, niż bylibyśmy skłonni przyznać. Nauka jest w końcu ludzkim wynalazkiem, a ludzie potrafią być zupełnie nieprzewidywalni. Choć w historii nauki znajdujemy wiele przykładów teorii naukowych, które nie były udane lub zostały obalone, postęp w nauce nie dokonuje się w procesie niekończącej się falsyfikacji. Weźmy choćby jeden przykład: kiedy w 1781 roku posłużono się klasyczną mechaniką newtonowską i prawem powszechnego ciążenia do przewidzenia orbity świeżo odkrytej planety Uran, okazało się, że przewidywania były błędne. Nie zinterpretowano tego jednak jako oznaki zawodności struktury mechaniki klasycznej i teorii pola grawitacyjnego.

Pamiętajmy, że właściwie niemożliwe jest uprawianie nauki bez metafizyki, bez pewnych elementów, których prawdziwość musimy przyjąć bez dowodu. Teorie naukowe są budowane na pojęciach abstrakcyjnych, na przykład cząstkach punktowych lub ciałach oddziałujących grawitacyjnie w taki sposób, jakby cała masa tych ciał była skupiona w ich środku. Jeśli zastanowimy się, jak prawa Newtona są stosowane w sytuacjach praktycznych, w rodzaju obliczania parametrów orbit planet, będziemy musieli przyznać, że żadne zastosowanie nie jest możliwe bez całej serii tak zwanych *pomocniczych* założeń lub hipotez.

Niektóre z tych założeń są formułowane jawnie, ale większość jest ukryta. Oczywiście, jeżeli stosujemy mechanikę Newtona do planet w Układzie Słonecznym, to poza innymi sprawami przyjmujemy założenie, że nasza wiedza o Układzie Słonecznym jest kompletna i nie ma żadnych zakłóceń, pochodzących od reszty Wszechświata. W wydanej niedawno książce zatytułowanej *Czas odrodzony* współczesny teoretyk Lee Smolin napisał: „Poszukując wglądu

w uniwersalne zależności fizyki, ograniczamy się do badania najprostszych zjawisk. Metoda ta stosowana już od czasów Galileusza doprowadziła do wielkiego sukcesu fizyki. Ja nazywam ją *fizyką zjawisk w pudełku*"[56].

Jedną z konsekwencji uprawiania fizyki zjawisk w pudełku jest to, że kiedy przewidywania są falsyfikowane przez dowody empiryczne, nigdy nie jest jasne, dlaczego tak się dzieje. Może dzieje się tak, ponieważ teoria jest fałszywa, ale możliwe jest, że po prostu fałszywe jest jedno lub więcej założeń pomocniczych. Dowód nie mówi nam, która z tych ewentualności zachodzi. Jest to *twierdzenie Duhema–Quine'a*, od nazwisk fizyka i filozofa Pierre'a Duhema oraz filozofa Willarda Van Ormana Quine'a.

I rzeczywiście, okazało się, że problem z orbitą Urana wynikał z jednego z założeń pomocniczych. Został rozwiązany po prostu przez powiększenie pudełka. John Adams i Urbain Le Verrier niezależnie od siebie zaproponowali, że w Układzie Słonecznym istnieje ósma, niezaobserwowana do tej pory planeta, która zakłóca orbitę Urana. W 1846 roku Johann Galle odkrył w odległości mniejszej niż jeden stopień od przewidywanej pozycji nową planetę, której nadano nazwę Neptun.

Rozochocony sukcesem Le Verrier w 1859 roku podjął próbę zastosowania tej samej logiki do rozwiązania innego problemu astronomicznego. Orbity planet nie są dokładnymi elipsami. Gdyby były, punkt orbity położony najbliżej Słońca każdej planety (nazywany peryhelium) byłby ustalony raz na zawsze, planeta przechodziłaby przez ten sam punkt za każdym obiegiem wokół gwiazdy. Tymczasem obserwacje astronomiczne pokazały, że za każdym obiegiem punkt peryhelium ulega niewielkiemu przesunięciu (precesji). Rozumiano, że większa część tej obserwowanej precesji jest skutkiem połączonego oddziaływania grawitacyjnego wszystkich pozostałych planet Układu Słonecznego. Efekt ten przewidywała teoria grawitacji Newtona.

Tylko że dla Merkurego, planety krążącej najbliżej Słońca, „newtonowska precesja" była przewidywana na poziomie 532 sekund łuku na wiek[57]. Obserwowana precesja była większa, wynosiła około 575 sekund łuku na wiek. Różnica to 43 sekundy łuku. Niedużo, ale

wartość ta kumuluje się i mniej więcej raz na trzy miliony lat daje jedną „dodatkową” orbitę.

Le Verrier postulował istnienie jeszcze jednej planety, położonej bliżej Słońca niż Merkury. Stała się ona znana pod nazwą Wulkan. Astronomie szukali jej, ale na próżno. Einstein z radością odkrył, że jego ogólna teoria względności przewiduje „relatywistyczny” wkład do precesji, równy dokładnie 43 sekundy łuku na wiek, mający źródło w zakrzywieniu czasoprzestrzeni wokół Słońca w pobliżu Merkurego[58]. Odkrycie to było dla Einsteina największym przeżyciem emocjonalnym w jego karierze naukowej: „Nie posiadałem się z radości i podniecenia przez wiele dni”[59].

Historia ta zdaje się wskazywać, że teorię należy porzucić tylko wtedy, gdy w jej miejsce dostępna jest wyraźnie *lepsza teoria*. Można dojść do wniosku, że teorie naukowe *nigdy nie są falsyfikowane*, ewentualnie tylko wykazywana jest ich niższa ranga w porównaniu z konkurencyjnymi rozwiązaniami alternatywnymi. Nawet wówczas jawnie fałszywe teorie mogą nadal funkcjonować. Wiemy, że w mikroskopowym świecie cząsteczek, atomów i cząstek subatomowych zasady dynamiki Newtona mają niższą rangę od mechaniki kwantowej, zasady te załamują się również wtedy, gdy ciało fizyczne o dowolnych rozmiarach porusza się z prędkością bliską lub równą prędkości światła. Wiemy, że prawo powszechnego ciążenia Newtona ma niższą rangę od ogólnej teorii względności Einsteina. Mimo to prawa Newtona pozostają w pełni satysfakcjonujące, gdy stosuje się je do „codziennych” obiektów i sytuacji, a fizycy i inżynierowie będą je chętnie wykorzystywać, choć wiemy, że „nie są prawdziwe”.

Filozofowie nauki oceniali problemy tego typu jako trudności nie do pokonania i ostatecznie kryterium falsyfikujące Poppera zostało odrzucone (aczkolwiek, co ciekawe, wciąż żyje w umysłach wielu aktywnych zawodowo naukowców). Fakt ten skłonił Paula Feyerabenda – będącego wśród filozofów nauki kimś takim jak Loki – do całkowitej rezygnacji z pojęcia metody naukowej i promowania anarchistycznej interpretacji postępu naukowego. W nauce, twierdzi Feyerabend, *wszystko jest dopuszczalne*. Zachęca naukowców,

> aby wyszli poza ustalone kręgi i albo wynaleźli nowy system pojęciowy, na przykład nową teorię, która kłóci się z najbardziej ugruntowanymi wynikami obserwacji i zadaje kłam najbardziej wiarygodnym zasadom teoretycznym, albo zaczerpnęli taki system spoza nauki, z religii, mitologii, z pomysłów amatorów lub plotących bez ładu i składu wariatów[60].

Według Feyerabenda postęp w nauce dokonuje się w całkowicie subiektywny sposób i naukowcom nie powinno przypisywać się szczególnego autorytetu: z uwagi to, w jaki sposób nauka stosuje logikę i rozumowanie, nie różni się ona od innych form racjonalnych dociekań. Twierdził, że w kryterium demarkacyjnym chodzi o to, aby stawiać naukę na piedestale, przez co dochodzi do usztywnienia postępu, ponieważ nauka staje się bardziej przesycona ideologią i dogmatyzmem.

W 1983 roku filozof Larry Laudan ogłosił, że problem demarkacyjny jest nierozwiązywalny, a więc stanowi pseudoproblem[61]. Według niego prawdziwe jest rozróżnienie na wiedzę, która jest rzetelna, i tę, która rzetelna nie jest, niezależnie od jej proweniencji. Terminy takie jak „pseudonauka" i „nienaukowy" są „tylko pustymi zwrotami, które mają oddziaływać na nas emocjonalnie"[62].

Dobrze, czas na pewne wyznania. Nie wierzę w to, że nauka w fundamentalny sposób jest anarchiczna, że nie ma żadnych reguł. Mogę się zgodzić, że nie ma reguł związanych z procesem twórczym, który zachodzi na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej. Wolicie indukcję? Proszę bardzo. Sądzicie, że lepsza jest dedukcja hipotez i późniejsze ich testowanie? Świetnie. Choć osobiście oddzielam grubą kreską szukanie nowych pomysłów od religii, mitologii, amatorów i wariatów[63], to pod koniec dnia nikogo specjalnie nie obchodzi, w jaki sposób opracowano nowe rozwiązania teoretyczne lub struktury, jeśli tylko powstała teoria *działa*.

Mimo wszystko, przynajmniej dla mnie, *musi być* jakaś różnica między nauką i pseudonauką, między nauką i czystą metafizyką. Jak twierdzi biolog ewolucyjny, który został filozofem, Massimo Pigliucci, „najwyższy czas, aby filozofowie ubrudzili sobie ręce i dołączyli do

boju, wnosząc własny wkład w bardzo ważne zadanie – czasem wręcz kluczowe – jakim jest rozróżnienie między sensem i nonsensem”[64].

Jeżeli zatem nie możemy użyć falsyfikowalności w roli kryterium demarkacyjnego, co zamiast tego można wykorzystać? Nie wydaje mi się, abyśmy mieli jakąkolwiek prawdziwą alternatywę poza przyjęciem czegoś, co mogę nazwać *kryterium empirycznym*. Wprowadzenie linii demarkacyjnej nie jest rodzajem dwuwartościowej oceny: tak-nie, dobrze-źle, czarny-biały. Musimy być gotowi na odcienie szarości. Sam Popper (który był w tym naprawdę dobry, tak przy okazji) szybko się z tym pogodził:

> kryterium demarkacji nie może być całkiem ostre, lecz jest stopniowalne: mamy do czynienia z teoriami dobrze sprawdzalnymi, trudno sprawdzalnymi i niesprawdzalnymi. Nauki empiryczne nie interesują się tymi ostatnimi. *Określić je można jako metafizyczne*[65].

Niektórzy naukowcy i filozofowie twierdzili, że ta „weryfikowalność” jest praktycznie równoważna falsyfikowalności, jednak nie zgadzam się z tym. Weryfikowalność znaczy tylko tyle, że teoria albo ma kontakt, albo przynajmniej niesie ze sobą jakąś obietnicę wejścia w kontakt z dowodami empirycznymi. Absolutnie nie sugeruje, co mielibyśmy *zrobić* w świetle tych dowodów. Jeśli dowód potwierdza słuszność teorii, to świetnie – otwieramy szampana, a potem zaczynamy rozglądać się za następnym testem. Gdy zaś dowód nie potwierdza teorii, to możemy się zastanowić albo pomajstrować przy pomocniczych założeniach. Tak czy inaczej, mamy nad czym pracować. *To właśnie nauka*.

Wracając do mojej metafory: dobrze sprawdzalna teoria to taka, w przypadku której podróż tam i z powrotem do Rzeczywistości Empirycznej jest stosunkowo prosta. Trudno sprawdzalna teoria to taka, w przypadku której podróż ta, niezależnie od powodów, jest bardziej skomplikowana. Niektóre teorie wymagają czasu, nim zostaną rozwinięte jak należy, nieraz mogą nawet być postrzegane jako nieudane, jeśli podda się je weryfikacji, zanim zawarte w nich

koncepcje i ograniczenia stosowalności zostaną w pełni zrozumiane. Czasem teoria będzie wymagała dowodu o bardzo dużym znaczeniu, którego zdobycie może zabrać dużo czasu. Peter Higgs opisał mechanizm, który został nazwany jego nazwiskiem, w artykule opublikowanym w 1964 roku. Mechanizm ten stał się zasadniczym składnikiem Modelu Standardowego fizyki cząstek, przyjętego obecnie kwantowego opisu wszystkich znanych cząstek elementarnych. Mechanizm jednak nie był przyjmowany jako „prawdziwy" aż do odkrycia bozonu Higgsa w Wielkim Zderzaczu Hadronów, niemal pięćdziesiąt lat później.

Nie miejmy złudzeń, jeżeli teoria nie jest w stanie dostarczyć choćby obietnicy pokonania morza – jeśli wpadnie w pułapkę sił pływowych wiru Charybdy – to jest to teoria niesprawdzalna. Nieważne, jak bardzo będziemy się starać, po prostu nie możemy sprowadzić teorii z powrotem do Rzeczywistości Empirycznej. Wynika z tego, że gdy teoria nie formułuje przewidywań albo formułuje przewidywania, które są mgliste i można je bez końca poprawiać, bardziej podobna jest do przepowiedni wróżbity lub tekstów oszusta sprzedającego „cudowne" leki. To czysta metafizyka, a nie nauka. W ten sposób docieramy do drugiego na liście moich ulubionych cytatów z Einsteina: „Raz za razem zamiłowanie do rozumienia prowadziło do iluzji, że człowiek jest zdolny racjonalnie objąć rozumem obiektywny świat samą czystą myślą, niewspartą na żadnych empirycznych podstawach – w skrócie, poprzez metafizykę"[66].

Chcę być dobrze zrozumiany. Stwierdziłem, że niemożliwe jest uprawianie nauki w jakiejkolwiek formie bez zaangażowania pewnych aspektów metafizyki. Metafizyczne prekoncepcje naukowców są kluczowym, nieodzownym składnikiem budowy każdej teorii naukowej. Jednak *konieczny* jest jakiś łącznik z dowodami empirycznymi. Musi zaistnieć napięcie między pomysłami i faktami. Problemem nie jest metafizyka sama w sobie, ale raczej charakter i objętość metafizycznej zawartości w teorii. Problemy pojawiają się, gdy *metafizyka stanowi wyłączną zawartość*.

Oczywiście, to tylko moja opinia. Jeżeli zgodzimy się, że istnieje potrzeba wprowadzenia kryterium demarkacyjnego, to zapewne

należałoby zadać pytanie, kto powinien być odpowiedzialny za używanie go do formułowania osądów. Filozofowie Don Ross, James Ladyman i David Spurrett twierdzą, że żadna z jednostek (taka jak ja lub oni) nie znajduje się w położeniu uprawniającym do formułowania takich osądów, powinno się raczej polegać na *instytucjach* nowoczesnej nauki[67]. Instytucje te narzucają standardy i normy, zapewniają testy i filtry, które, teoretycznie, powinny wykluczyć roszczenia do obiektywnej wiedzy wywodzącej się z czystej metafizyki. Robią to po prostu przez odmowę finansowania projektów badawczych, które nie spełniają kryteriów, albo przez odmowę publikacji artykułów w uznanych periodykach naukowych.

Tylko że, moim zdaniem, nawet instytucje są zawodne, a społeczność naukowa, jak każda społeczność, może paść ofiarą syndromu myślenia grupowego[68]. Przyszło nam żyć w czasach spod znaku przepastnego rogu obfitości metafizycznych prekoncepcji, dla których dotkliwie brak empirycznych faktów. Mamy szalenie dużo pomysłów, lecz niewiele danych. Jak zobaczymy w rozdziale 10, osobiście jestem przekonany, że tę linię demarkacyjną przekroczyło kilku teoretyków, w tym osób bardzo dobrze znanych opinii publicznej, i nie jestem w tej opinii odosobniony. Jednak, przynajmniej obecnie, instytucje nauki zdają się nie zwracać na to uwagi.

Zachęcam więc do wyrabiania sobie własnych opinii.

Teoria naukowa, która została przyjęta, służy co najmniej dwóm celom. Jeśli jest to teoria wyrażona w formie jednego lub większej liczby równań matematycznych, wówczas równania te pozwalają nam wyliczać, co się stanie w przypadku konkretnego zbioru okoliczności lub danych wejściowych. Podstawiamy liczby, kręcimy korbką i dostajemy więcej liczb. Wyniki te mogą stanowić przewidywania efektów obserwacji lub skutków eksperymentów, które to obserwacje i eksperymenty możemy następnie zaplanować i przeprowadzić. Ewentualnie mogą być użyteczne jako podstawa do obmyślenia nowych przewidywań albo wynalezienia nowego urządzenia elektronicznego, wybudowania drapacza chmur bądź rozplanowania sieci energetycznej dla miasta. Kiedy teoria wykorzystywana jest w ten sposób, zasadniczo koncentrujemy

uwagę na danych wejściowych i wyjściowych, zatem możemy nie mieć potrzeby zagłębiania się za bardzo w to, co tak naprawdę teoria mówi. Pod warunkiem że mamy zaufanie do jej prawidłowości i dokładności, możemy z przyjemnością użytkować teorię jak „czarną skrzynkę", instrumentalnie.

Drugi cel koncentruje się wokół tego, jak teoria powinna być *interpretowana*. Równania wyrażane są za pomocą zbioru pojęć ujętych w formie dość abstrakcyjnych symboli. Pojęcia te i symbole mogą opisywać własności i zachowanie niewidzialnych składników świata, takich jak elektrony, oraz sił działających pomiędzy nimi albo wytwarzanych lub przenoszonych przez nie oddziaływań. Najprawdopodobniej równania są tak skonstruowane, aby wszystko, co nas interesuje, zachodziło w trójwymiarowej przestrzeni i przedziale czasu liczonym od jakiejś chwili w przeszłości do teraz albo od teraz do wybranej chwili w przyszłości. Interpretacja tych symboli mówi nam coś ważnego na temat tego, co znajdujemy w przyrodzie. Nie chodzi już o zdolność do *używania* teorii. Teraz chodzi o to, co teoria wnosi do naszego *rozumienia* świata.

Można pomyśleć, że przesadnie się nad tym rozwodzę. Czyż nie jest przecież raczej oczywiste, w jaki sposób teoria fizyczna powinna być interpretowana? O co ten szum? Jeżeli jesteśmy gotowi zaakceptować istnienie obiektywnej rzeczywistości (Pierwszy Sąd Logiczny Realistów) i realność istnienia niewidzialnych składników materii, takich jak fotony i elektrony (Drugi Sąd Logiczny Realistów), to z całą pewnością nie potrzeba wielkiego wysiłku wyobraźni, aby przyjąć...

> ***Trzeci Sąd Logiczny Realistów:***
> *Podstawowe pojęcia pojawiające się w teoriach naukowych odzwierciedlają rzeczywiste własności i zachowania rzeczywistych ciał fizycznych.*

Przez „podstawowe pojęcia" rozumiem dobrze znane terminy, których używamy do opisu własności i zachowania ciał w naszych teoriach. Do pojęć tych należą masa, pęd, energia, spin i ładunek elektryczny, a zdarzenia z ich udziałem zachodzą w czasoprzestrzeni.

Ważne, aby odróżniać je od innych, bardziej abstrakcyjnych konstrukcji matematycznych, których naukowcy używają do manipulowania tymi podstawowymi pojęciami, aby wykonać pewien określony rodzaj obliczeń. Na przykład w mechanice klasycznej możliwe jest odwzorowanie złożonego ruchu dużego zbioru ciał fizycznych w wygodniejszy sposób, jako ruchu pojedynczego punktu w czymś, co nazywane jest przestrzenią konfiguracyjną lub przestrzenią fazową. Nikt nie sugeruje, że takie abstrakcje powinny być interpretowane realistycznie, dotyczy to tylko podstawowych pojęć leżących u ich podstaw. Wkrótce zobaczymy, że argumentacje dotyczące interpretacji mechaniki kwantowej bazują głównie na interpretacji funkcji falowej. Czy funkcja falowa jest pojęciem podstawowym, o rzeczywistych własnościach i realnym zachowaniu? Czy też jest konstrukcją abstrakcyjną?

Trzeci sąd logiczny wydaje się jasny, ale mimo to czuję się w obowiązku zauważyć, że spójność doświadczeń dnia codziennego i mechaniki klasycznej sprawiła, iż przestaliśmy dostrzegać różnice między światem fizycznym a sposobami, do jakich się uciekamy, aby go *odwzorować*.

Jako przykładem ilustrującym posłużmy się drugą zasadą dynamiki Newtona. Dziś znamy tę zasadę pod postacią dość prostego wzoru:

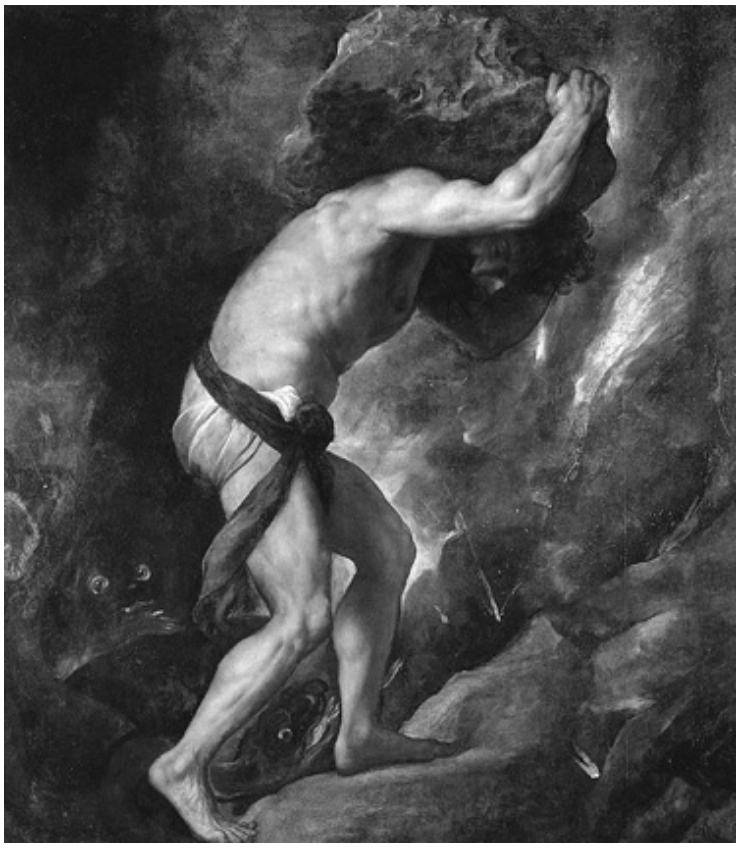
Oznacza to, że ruch przyspieszony wystąpi, gdy zadziałamy siłą (wywrzemy „oddziaływanie” jakiegoś rodzaju) na ciało o pewnej masie. Zatem podczas gdy na pewno nie skłamiemy, mówiąc, że pojęcie siły mechanicznej wciąż ma dzisiaj duże znaczenie, to jednak, jak objaśniłem w rozdziale 1, na przełomie XVIII i XIX wieku uwaga fizyków przeniosła się z siły na *energię* jako pojęcie bardziej fundamentalne. Kiedy moja stopa styka się z kamieniem, oddziałuję na kamień pewną siłą. Jednak lepszy sposób myślenia o tej sytuacji

polega na spojrzeniu na oddziaływanie jako na proces przeniesienia energii na kamień.

Określenie „energia” zostało po raz pierwszy wprowadzone na początku XIX wieku i stopniowo stało się jasne, że jest to wielkość podlegająca zasadzie zachowania – energia nie jest ani tworzona, ani niszczona, po prostu dochodzi do przekazania jej w obrębie danego układu fizycznego przez jedno ciało fizyczne drugiemu ciału fizycznemu albo następuje zmiana jednej formy energii w drugą. Uświadomiono sobie, że energia kinetyczna – energia związana z ruchem ciał – nie podlega zasadzie zachowania. Fizycy doszli do wniosku, że wyłącznie za sprawą swych właściwości lub zaistniałych okoliczności układ fizyczny może również mieć energię *potencjalną*. Kiedy to zrozumiano, możliwe stało się sformułowanie zasady zachowania energii *całkowitej* – będącej sumą energii kinetycznej i potencjalnej – i osiągnięto to głównie dzięki wysiłkom fizyków zajmujących się prawami termodynamiki.

Dziś zastępujemy siłę newtonowską tempem zmian w przestrzeni energii potencjalnej. Pomyślmy o tym w ten sposób. Syzyf, król Efyry, został skazany na wieczne dźwiganie na szczyt góry ogromnego głazu, który zaraz potem stacza się z powrotem na sam dół (rysunek 8). Kiedy Syzyf pcha głaz w górę, nadaje mu energię kinetyczną zależną od masy głazu i prędkości, z jaką się toczy lub jest wnoszony. Jeśli pominiemy straty wywołane tarciem, cała energia kinetyczna przekształcana jest na szczycie w energię potencjalną. Ta energia potencjalna znajduje odbicie w tym, jak nachylone jest zbocze góry. Kiedy głaz stacza się z powrotem w dół, energia potencjalna zamieniana jest w energię kinetyczną. Dla danej masy im większe nachylenie zbocza (większa siła), tym większe przyspieszenie.

Pamiętając o tym, dlaczego mielibyśmy się wahać, choćby przez krótką chwilę, przed przyjęciem Trzeciego Sądu Logicznego Realistów? Syzyf jest postacią z mitologii greckiej, jednak wokół nas jest wiele autentycznych gór i mnóstwo prawdziwych głazów, toteż nie mamy żadnych wątpliwości, że głaz stacza się w dół. Przyspieszenie jest czymś, czego doświadczaliśmy tysiące razy – nie wątpimy w jego realność.



Rysunek 8. Mit o Syzyfie (obraz Tycjana z 1549 roku) ilustruje związek energii kinetycznej z energią potencjalną.

Równanie: siła = masa × przyspieszenie, jest częścią klasycznej teorii naukowej i musimy pamiętać, że nie jest możliwe uprawianie nauki bez metafizyki, bez przyjęcia pewnych założeń, na których poprawność nie możemy sprokurować żadnych dowodów. I gdyby wyleciało nam to z głowy, przypomnijmy sobie jeszcze, że aby stosować to równanie, musimy też uprawiać fizykę zjawisk w pudełku.

Pierwszy wniosek, jaki możemy wysnuć, wygląda następująco: zbocze wzgórza odpowiada tempu zmian energii potencjalnej *w przestrzeni*. Przyspieszenie to tempo zmian prędkości *w czasie*. Natomiast prędkość, podobnie, to tempo zmian położenia głazu *w przestrzeni wraz z upływem czasu*. Fakt, iż druga zasada dynamiki Newtona wymaga obecności przestrzeni i czasu, nie powinien być dla nas niespodzianką – ostatecznie wszystko to dotyczy ruchu.

Jednak, jak objaśniłem to w rozdziale 2, newtonowskie pojęcia przestrzeni absolutnej i czasu absolutnego są całkowicie metafizyczne. Choć pozornie mogłoby wydawać się inaczej, ruch dwóch obiektów zawsze postrzegamy jedynie jako ich zbliżanie się lub oddalanie się od siebie, czyli rejestrujemy wyłącznie zmianę ich *względnych* położeń. Ruch jest pojęciem względnym, zachodzącym w przestrzeni i czasie, które zasadniczo definiowane są tylko przez związki zachodzące pomiędzy samymi ciałami. Największy konkurent Newtona, filozof Gottfried Wilhelm Leibniz, twierdził: „nie można zgodzić się na fikcję skończonego materialnego wszechświata, który w całości porusza się w nieskończonej, pustej przestrzeni. To zupełnie niedorzeczne i nierealne”[69].

Newton doskonale rozumiał, w co się pakuje. Dlaczego więc obstawał przy układzie przestrzeni absolutnej i czasu absolutnego? Cóż, dlatego, że przyjmując tę metafizyczną prekoncepcję, odkrył, iż jest w stanie sformułować bardzo skuteczne zasady opisujące ruch ciał fizycznych. Skuteczność wnosi pewien istotny stopień zadowolenia i skłonność do osłabienia nieufności wobec ważkich, aczkolwiek czasem dość wątpliwych podstaw, na których zbudowane są opisy teoretyczne.

Jest jeszcze kwestia newtonowskiej definicji masy. Oto ona: „Ilość materii jest jej miarą, która wynika łącznie z jej gęstości i wielkości zajętego miejsca. […] Jest to ta wielkość, którą wszędzie dalej rozumiem pod określeniami ciało (*corpus*) lub masa (*massa*). Ta sama wielkość występuje pod nazwą ciężaru, ponieważ jest proporcjonalna do ciężaru, jak stwierdziłem drogą przedstawionych niżej bardzo dokładnych doświadczeń z wahadłami”[70]. Jeżeli użyte przez Newtona słowo *bulk* zinterpretujemy jako objętość, wówczas masa ciała jest po prostu równa iloczynowi gęstości (wyrażonej na przykład w kilogramach na metr sześcienny) i objętości ciała (na przykład w metrach sześciennych). Nie trzeba dużo czasu, aby zauważyć, że definicja ta jest całkowicie cyrkularna, o czym napisał wiele lat później Mach: „Jeśli gęstość możemy zdefiniować jedynie jako masę na jednostkę objętości, to cyrkularność jest oczywista”[71].

Nie chcę nikogo przesadnie niepokoić, ale nieważne, jak bardzo realne może wydawać się pojęcie masy, prawda jest taka, że nigdy

go nie rozumieliśmy. Einstein mocno namieszał swoim słynnym równaniem $E = mc^2$, które nabiera głębszego sensu, gdy zapisane jest w postaci $m = E/c^2$. „Masa ciała jest miarą zawartej w nim energii”[72]. W Modelu Standardowym fizyki cząstek przyjmuje się, że cząstki elementarne, takie jak elektrony, „zyskują masę” dzięki oddziaływaniu z polem Higgsa (to właśnie mechanizm Higgsa). Masy protonów i neutronów (więc także masy wszystkich atomów naszych ciał) w rzeczywistości pochodzą w dużej części z *energii* oddziaływania kolorowego (przenoszonego przez gluony), które spaja znajdujące się w ich wnętrzu kwarki górne i dolne[73].

Widzicie, co mam na myśli? Jeżeli równanie tak znajome i proste jak to: siła = masa × przyspieszenie, obfituje w problemy pojęciowe i trudności interpretacyjne, to dlaczego mielibyśmy zakładać, że w ogóle cokolwiek rozumiemy?

Jeszcze raz powinniśmy pamiętać, że wcale nie musimy czegoś w pełni rozumieć, aby tego używać. Wiemy, że to działa (w granicach stosowalności), i z pewnością możemy to wykorzystać do wyliczenia bardzo wielu pożytecznych rzeczy. Jednak druga zasada dynamiki jest czymś więcej niż czarną skrzynką. Istnieje kontekst, w którym pozwala na autentyczny wgląd w mechanizmy natury, mimo że możemy nie mieć pewności co do znaczenia części z funkcjonujących w niej podstawowych pojęć.

Oczywiście wiemy, że prawa fizyki Newtona zostały zastąpione szczególną i ogólną teorią względności Einsteina, która zmieniła nasz sposób myślenia o przestrzeni, czasie i masie. Wciąż jednak są to teorie klasyczne (w tym sensie, że nie są to teorie kwantowe). Możesz mi wierzyć, że w teoriach względności nie ma nic, co powinno podważyć nasze zaufanie do Trzeciego Sądu Logicznego Realistów. Choć wciąż są one bardzo powierzchowne, musimy pogodzić się z tym, że nawet podstawowe pojęcia występujące w naszych teoriach czasami wymagają od nas zrozumienia ich na nieco głębszym poziomie. Przestrzeń, czas i masa są czymś realnym, ale nasze ich rozumienie w drugiej zasadzie dynamiki jest oparte tylko na przybliżeniu. W końcu wszystkie teorie naukowe są wyłącznie prowizoryczne. Są prawdziwe tylko w przybliżeniu lub

warunkowo, słuszne do chwili gdy dostarczają opisu znajdującego uzasadnienie w dowodach.

Tak czy inaczej, jeśli udało mi się zasiać ziarno niepokoju, to osiągnąłem swój cel. Jak przekonaliśmy się już w rozdziale 1, w mechanice kwantowej wątpliwości te wracają ze zdumiewająco zwielokrotnioną siłą.

Chciałem pokazać, że dyskusja na temat interpretacji mechaniki kwantowej może szybko ugrzęznąć i zostać pogmatwana przez wątek związany z „rzeczywistością". Istnieje tendencja do łączenia obiektywnej rzeczywistości (Pierwszy Sąd Logiczny Realistów), rzeczywistości ciał „niewidzialnych", takich jak elektrony (Drugi Sąd Logiczny), oraz rzeczywistości odzwierciedlania własności i zachowania tych ciał w teoriach naukowych (Trzeci Sąd Logiczny). Chętnie przystałbym na to, że owa trójka sądów logicznych nie jest wcale łatwa do rozdzielenia, ale wydaje mi się, że sporo można zyskać, rozważając je rozdzielnie.

Można odnieść wrażenie, iż Trzeci Sąd Logiczny jest zależny od przyjęcia obu pozostałych sądów. Z pewnością bezcelowe jest argumentowanie na rzecz realistycznej interpretacji naukowego opisu przy jednoczesnym zaprzeczaniu temu, że coś jest realne, kiedy na to nie patrzymy lub o tym nie myślimy, a także wówczas, gdy nasze dowody są jedynie pośrednie[74]. Tylko że, oczywiście, przyjęcie dwóch pierwszych sądów logicznych wcale *nie pociąga za sobą przyjęcia sądu trzeciego*. Możemy przyjąć sąd pierwszy i drugi, ale zdecydować się na odrzucenie sądu trzeciego. Doszedłem do przekonania, że najlepszym sposobem na uświadomienie wagi sporu na temat interpretacji mechaniki kwantowej jest ukazanie go *nie* jako sporu o „naturę rzeczywistości", ale jako sporu o realizm (lub jego brak) w naszym *odwzorowaniu* rzeczywistości. Krótko mówiąc, jest to spór o Trzeci Sąd Logiczny.

Dla dopełnienia obrazu chcę jasno stwierdzić, że naukowy realizm to trochę szerszy temat od naszych dotychczasowych rozważań[75]. Nadal powinniśmy wymagać, aby teorie naukowe, interpretowane realistycznie zgodnie z Trzecim Sądem Logicznym, spełniały kryterium empiryczne: mogą być poddawane testom i albo zyskają potwierdzenie jako w przybliżeniu lub warunkowo poprawne

(aktualnie), albo po porównaniu z dowodami empirycznymi okaże się, że formułowane przez nie przewidywania są fałszywe. Powinniśmy też ustalić, że kiedy mówimy o „postępie" w nauce, rozumiemy, iż opiera się on sukcesywnie na *coraz precyzyjniejszych odwzorowaniach*, będących wynikiem wielokrotnych przepraw przez morze Statkiem Nauki, tam i z powrotem, dopracowywania i zacieśniania związku między naszymi metafizycznymi prekoncepcjami a danymi doświadczalnymi. Filozof Hilary Putnam napisał: „Argument przemawiający za realizmem jest taki, że to jedyna filozofia, która sukcesu nauki nie kojarzy z cudem"[76]. Czasami mówimy o tym jako o argumencie *z braku cudu*.

Wydaje się, że zapewniłoby to stosunkowo proste rozróżnienie na realizm i empiryzm (albo antyrealizm), jednak nie bądźmy zbyt pochopni. W poszukiwaniu pewnych sprzeczności występujących między realizmem a antyrealizmem filozof John Worrall zaproponował tezę będącą rozwinięciem poglądów, które po raz pierwszy opisał matematyk Henri Poincaré. Chodzi o *realizm strukturalny*. Według Worralla teorie naukowe mówią jedynie o formie lub *strukturze* rzeczywistości, lecz nie milczą na temat *natury* tej rzeczywistości[77].

Kiedy jedna teoria zastępuje drugą, zmianie może ulec zapis matematyczny, zmienić się może nawet interpretacja podstawowych pojęć, lecz struktura lub sieć związków pomiędzy wielkościami fizycznymi jest zachowana. Ogólnie mówiąc, lepsza teoria przejmie wszystkie związki występujące pomiędzy zjawiskami ustanowione przez tę, którą zastępuje. Na przykład opis fotonów w mechanice kwantowej zachowuje wszystkie związki strukturalne dotyczące zjawisk dyfrakcji i interferencji, opisane wcześniej przez falową teorię światła, mimo że aparat matematyczny obu teorii jest diametralnie różny.

Realizm strukturalny występuje w dwóch odmianach. Jest wersja kantowska, która sugeruje, że teorie naukowe dotyczą rzeczy, jakimi się wydają, mając formę struktury związków empirycznych. Wciąż jednak, mimo wszystko, zakłada się istnienie metafizycznych rzeczy samych w sobie, ponieważ Kant twierdzi, że nie ma przejawów bez czegoś, co się przejawia. Mniej więcej takie też było stanowisko

Poincarégo. W drugim, bardziej empirycznym wariancie związki strukturalne składają się na całość, nie ma żadnych rzeczy samych w sobie. Skłania to do zastanowienia, jakim sposobem możliwe jest ustanowienie związku, gdy nie ma nic, co w takim związku miałoby się znaleźć, ale być może jest to naprawdę mało istotne. Nawet gdy rzeczy same w sobie istnieją, nie potrafimy powiedzieć o nich nic sensownego.

Takie podejście sprawia, że rozróżnienie realistyczny/antyrealistyczny staje się mniej oczywiste. Filozof Ian Hacking spodziewał się wystąpienia tego dylematu i przypomniał, że nauka to coś więcej niż teoretyczne odwzorowanie. Nauka realizuje dwa główne cele: teorię *i* eksperyment. Teorie mają odwzorowywać, mówi Hacking, natomiast eksperyment ma interweniować. Tworzymy odwzorowanie, żeby interweniować, i interweniujemy w świetle naszych odwzorowań. Napisał:

> Podejrzewam, że nie ma ostatecznego argumentu za lub przeciw realizmowi na poziomie odwzorowania. Kiedy przechodzimy od odwzorowania do interwencji, do ostrzeliwania kul niobu pozytonami, zdaje się, że antyrealizm słabnie... Ostatecznym sędzią w filozofii nie jest to, jak *myślimy*, ale co *robimy*[78].

Teorie pojawiają się i znikają, twierdzi Hacking, interwencja – eksperyment – jest ostatecznym sędzią w irytujących sporach dotyczących rzeczywistości. Jak przekonamy się w dalszej części książki, zdecydowanie, czy dane odwzorowanie spełnia Trzeci Sąd Logiczny, może być nieco karkołomne. W takich sytuacjach pomocne będzie sięgnięcie po kolejny sąd logiczny, który przybliży nas do podjęcia decyzji. Ryzykując więc zatarcie rozróżnienia Hackinga na odwzorowanie i interwencję, proponuję sparafrazować jego stwierdzenie w następujący sposób:

> ***Czwarty Sąd Logiczny Realistów:***
> *Teorie naukowe podsuwają nam spostrzeżenia i zapewniają zrozumienie, pozwalając* ***robić*** *rzeczy, których w przeciwnym razie nie rozważalibyśmy lub nie sądzilibyśmy, że są możliwe.*

Myślę, że jest to „aktywny” sąd logiczny. Tylko traktując odwzorowanie poważnie, mamy solidną podstawę do działania. Może to przyjąć formę poszukiwania nowych danych doświadczalnych i znaleźć odbicie w projektowaniu, budowie urządzeń, wykonywaniu nowych eksperymentów lub przeprowadzaniu nowych obserwacji. Nie oznacza to, że nie jest możliwe, aby „bierne”, antyrealistyczne odwzorowanie angażowało i motywowało eksperymentatorów. Jednak, jak się przekonamy, zdarza się tak najczęściej dlatego, iż eksperymentatorzy, którym na tym zależy, mają tendencję do faworyzowania odwzorowań realistycznych i na ogół nie czują się dobrze z antyrealizmem.

Chcę przeciwstawić tym słowom poglądy antyrealistycznego filozofa Basa van Fraassena, który w latach siedemdziesiątych XX wieku rozwinął doktrynę filozoficzną znaną jako *empiryzm konstruktywny*, będącą mniej dogmatyczną wersją pozytywizmu logicznego. Van Fraassen twierdzi, że teorie naukowe muszą być jedynie „empirycznie zadowalające”. Wystarczy, aby odwzorowanie zawierało wszelkie dane empiryczne i umożliwiało formułowanie pewnych przewidywań, ale powinniśmy unikać wplątywania się w nadmiar metafizyki. Odwzorowanie jest narzędziem. Biernie odwzorowuje, nic więcej.

W takim razie jest to sąd logiczny o randze ostatniej deski ratunku. Skoro na poziomie Trzeciego Sądu Logicznego istnieją argumenty przemawiające za obiema możliwościami, to będziemy szukali wskazówki w tym, czy dane odwzorowanie stanowi bodziec do podjęcia *działania*. Jeśli odwzorowanie ma charakter aktywny, wówczas będziemy skłonni przyjąć, że jest to odwzorowanie realistyczne. Jeżeli zaś ma charakter bierny, będziemy mogli uważać je za antyrealistyczne.

Dobrze. Wystarczy tego[79]. Na czym to stanęliśmy?

49 Carl Zimmer, *In Science*, *It's Never 'Just a Theory'*, „New York Times", 8 kwietnia 2016 r., http://www.nytimes.com/2016/04/09/science/in-science-its-never-just-a-theory.html?_r=0 (dostęp 4.01.2021).

50 Czytelnicy powinni zwrócić uwagę na to, że nie chodzi tu o słynny „paradoks czarnego kruka", opisany przez filozofa pozytywistę Carla Hempla w latach czterdziestych XX wieku. Jeżeli wszystkie kruki są czarne, to logika nakazuje wysnuć wniosek, że jakikolwiek (i każdy) obiekt, który nie jest czarny, nie jest krukiem. Podczas gdy bez wahania zgodzimy się z tym, że zaobserwowanie kolejnego czarnego kruka stanowi dowód przemawiający za słusznością teorii, to jednak z pewnością mielibyśmy problem z zaakceptowaniem w roli materiału dowodowego obserwacji, której obiektem jest zielone jabłko.

51 Bertrand Russell, *Problemy filozofii*, przeł. Wojciech Sady, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004.

52 Co nas nie zaskakuje, im bardziej sprzeczne z intuicją przewidywania, tym bardziej prawdopodobne jest to, że naukowcy będą podejrzliwie traktować ich źródło. Działa to mniej więcej tak: To śmieszne... Jak coś takiego może być prawdą? Co takiego? To prawda?! Wszyscy święci w niebie! To jak brzmi ta teoria?

53 Przegląd zagadnień związanych z filozoficznym programem naturalizowanej metafizyki można znaleźć w: James Ladyman, Don Ross, David Spurrett i John Collier, *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford University Press, Oksford 2007.

54 Michela Massimi, korespondencja osobista, 25 marca 2019 roku.

55 Karl Popper, *Droga do wiedzy: domysły i refutacje*, przeł. Stefan Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 67.

56 Lee Smolin, *Czas odrodzony. Od kryzysu w fizyce do przyszłości Wszechświata*, tłum. Tomasz Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015, s. 46.

57 Pełny okrąg to 360 stopni, jedna minuta łuku to jedna sześćdziesiąta stopnia. Jedna sekunda łuku jest więc równa jednej sześćdziesiątej minuty łuku. Wobec tego 532 sekundy łuku odpowiadają 0,15 stopnia.

58 Punkt peryhelium innych planet również ulega precesji wywołanej krzywizną czasoprzestrzeni, jednak im dalej planeta krąży wokół Słońca, tym mniejszy jest wkład relatywistyczny.

59 Albert Einstein, list do Paula Ehrenfesta, 17 stycznia 1916 roku, cyt. za: Robert E. Kennedy, *A Student's Guide to Einstein's Major Papers*, Oxford University Press, Oksford 2012. Cytat znajduje się na s. 214.

60 Paul Feyerabend, *Przeciw metodzie*, przeł. Stefan Wiertlewski, Siedmioróg, Wrocław 1996.

61 To taka standardowa sztuczka filozoficzna.

62 Larry Laudan, *The Demise of the Demarcation Problem*, w: Robert S. Cohen i Larry Laudan (red.), *Physics, Philosophy and Psychoanalysis*, D. Reidel, Dordrecht 1983, s. 125.

63 Nie dlatego, że miałbym coś przeciwko religii, mitologii, amatorom i wariatom jako źródłom hipotez naukowych, ale poważnie wątpię w skuteczność takiego podejścia.

64 Massimo Pigliucci, w: Massimo Pigliucci i Maarten Boudry (red.), *The Philosophy of Pseudoscience: Reconsidering the Demarcation Problem*, University of Chicago Press, Chicago 2013, s. 26.

65 Karl Popper, *Droga do wiedzy…*, op. cit., s. 431. Pozwoliłem sobie użyć kursywy.

66 Albert Einstein, *On the Generalised Theory of Gravitation*, „Scientific American", kwiecień 1950, s. 13.

67 Don Ross, James Ladyman i David Spurrett, *In Defence of Scientism*, w: James Ladyman, Don Ross, David Spurrett i John Collier, *Every Thing Must Go…*, op. cit., s. 33–38.

68 Zob. np.: Lee Smolin, *Kłopoty z fizyką. Powstanie i rozkwit teorii strun, upadek nauki i co dalej*, tłum. Jerzy Kowalski-Glikman, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008; Jim Baggott, *Pożegnanie z rzeczywistością. Jak współczesna fizyka odchodzi od poszukiwania naukowej prawdy*, przeł. Marek Krośniak, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015.

69 Gottfried Wilhelm Leibniz w listach do Samuela Clarke'a (1715–1716), w: *Collected Writings*, red. George H.R. Parkinson, J.M. Dent & Sons, Londyn 1973, s. 226.

70 Isaac Newton, *Matematyczne zasady filozofii naturalnej*, przeł. Sławomir Brzezowski, Copernicus Center Press, Kraków 2015, s. 89.

71 Ernst Mach, *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*, wyd. 4, przeł. Thomas J. McCormack, Open Court Publishing, Chicago 1919, s. 194.

72 Albert Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, „Annalen der Physik" 1905, nr 18, s. 639–641. Artykuł ten został

przetłumaczony i przedrukowany w: John Stachel (red.), *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*, wydanie z okazji setnej rocznicy, Princeton University Press, Princeton 2005. Cytat pojawia się na s. 164.

73 Zob. Jim Baggott, *Masa: od greckich atomów do pól kwantowych*, przeł. Urszula i Mariusz Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2018.

74 Niezależnie, czy zgadzamy się z tym, czy nie, powinniśmy przyznać, że niektóre tradycje filozoficzne oparte są na poglądzie mówiącym o odrzuceniu obiektywnej rzeczywistości (albo przynajmniej zachowaniu wobec niej postawy agnostycznej), przy jednoczesnej akceptacji tego, iż wciąż jest możliwe opracowanie wiernych odwzorowań wrażeń zmysłowych.

75 Zob. np. Richard Boyd, *On the Current Status of Scientific Realism*, „Erkenntnis"1983, nr 19, s. 45–90. Przedruk w: Richard Boyd, Philip Gaspar i John D. Trout (red.), *The Philosophy of Science*, MIT Press, Cambridge, MA 1991, zwłaszcza s. 195.

76 Hilary Putnam, *Mathematics, Matter and Method*, Cambridge University Press, Cambridge 1975, s. 73. Cyt. za: James Ladyman, *Structural Realism*, „Stanford Encyclopedia of Philosophy", zima 2016, s. 6.

77 Warto zauważyć, że realizm strukturalny nie jest następną, odmienną interpretacją mechaniki kwantowej – kwestia, którą będziemy w tej książce rozważać, związana jest z zapytaniem, czy interpretacje mechaniki kwantowej są strukturalnie realistyczne.

78 Ian Hacking, op. cit., s. 31. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

79 Czytelnicy mogą być zawiedzeni, że nigdzie nie wspominam o *Strukturze rewolucji naukowych* autorstwa filozofa Thomasa Kuhna, jego poglądach na normalną naukę, prowadzoną w obrębie *paradygmatu*, i nadzwyczajną, zmieniającą paradygmaty, rewolucyjną naukę. Szczerze mówiąc, pojęcia te nie są istotne w odniesieniu do tezy, jaką stawiam w tej książce, choć nie znaczy to, że nie są fascynujące. Z braku miejsca ograniczę informacje do tego przypisu, lecz zachęcam czytelników do zapoznania się ze zdaniem kilku krytyków Kuhna – zwłaszcza Poppera – w publikacji zatytułowanej *Criticism and the Growth of Knowledge* pod redakcją Imre Lakatosa i Alana Musgrave'a, wydanej w 1970 roku przez Cambridge University Press.

ROZDZIAŁ 4

Gdy Einstein schodził na śniadanie

Ponieważ nie da się napisać książki o mechanice kwantowej bez rozdziału poświęconego debacie Bohra z Einsteinem

Zbrojni w takie spojrzenie na fach, jakim jest tworzenie teorii naukowych, cofnijmy się do 1927 roku.

Debaty toczone przez Bohra, zarówno ze Schrödingerem, jak z Heisenbergiem, zapoczątkowały okres głębokiej introspekcji. Jak przekonaliśmy się w rozdziale 1, Schrödinger optował za realistyczną interpretacją funkcji falowej, w rozumieniu Trzeciego Sądu Logicznego. W jego opinii funkcja falowa była czymś konkretnym i fizycznie namacalnym, czymś łatwym do wyobrażenia, pojęciem podstawowym. Heisenberg preferował znacznie bardziej pozytywistyczną czy też antyrealistyczną interpretację mechaniki kwantowej. Odrzucił jakąkolwiek sugestię, że materia na najgłębszym poziomie ma naturę falową, którą łatwo daje się zobrazować. Zamiast tego wolał skupić się na rzeczach, które można zaobserwować, takich jak linie w widmie atomowym i wynikająca z takich pomiarów nieunikniona nieciągłość i nieoznaczoność. Bohr wahał się między tymi dwiema ekstremalnymi postawami, dostrzegając poprawność obydwu opisów, lecz zakłopotany faktem, że nie potrafi znaleźć na nie własnych słów.

Ostatecznie, po pewnym zastanowieniu, doszedł do wniosku, że język fizyki klasycznej, język fal i cząstek, przyczynowości i ciągłości, nie nadaje się do opisu zjawisk kwantowych. Tylko że dla nas, inteligentnych bytów, których doświadczenie ogranicza się do świata klasycznego, to jedyny język, jakim dysponujemy.

Niezależnie od tego, jaka jest prawdziwa natura elektronu samego w sobie, przejawiane przezeń zachowania uwarunkowane są rodzajem doświadczeń, które zdecydujemy się przeprowadzić. Te, z definicji, wymagają aparatury o wymiarach klasycznych, zapewniającej wyniki na tyle wyraźne, by dało się je zaobserwować i zapisać w laboratorium, czy to w postaci śladów pozostawionych w komorze mgłowej, czy serii punktów na naświetlanej kliszy fotograficznej, które układają się we wzór interferencyjny zaprezentowany na rysunku 4.

Zatem eksperyment pewnego typu będzie dostarczał wyniki, które interpretujemy, posługując się językiem fizyki klasycznej, jako dyfrakcję i interferencję elektronów. Konkludujemy, że w tym eksperymencie elektron jest falą. Eksperyment innego typu przyniesie wyniki, które interpretujemy jako trajektorie i zderzenia zlokalizowanych elektronów. Wnioskujemy, że w tym eksperymencie elektron jest cząstką. Bohr dowodził, że te doświadczenia wzajemnie się wykluczają. Nie możemy zaprojektować eksperymentu, który zademonstrowałby obydwa typy zachowań jednocześnie, nie dlatego, że brak nam pomysłowości, ale dlatego, że taki eksperyment jest niewykonalny.

Otrzymujemy świat kwantowy zbudowany z cieni rzucanych przez nasz klasyczny aparat pomiarowy (pomyśl o jaskini Platona). Możemy zobaczyć falowy cień elektronu lub jego cień cząsteczkowy. Jednak ponieważ nie jesteśmy w stanie skonstruować innego aparatu niż taki o wymiarach klasycznych, nie możemy zobaczyć, czym elektron *jest naprawdę*: nigdy nie będziemy mogli dowiedzieć się czegokolwiek o elektronie samym w sobie. Pozostaje nam radzić sobie z fundamentalnym dualizmem korpuskularno-falowym, światem kwantowym, w którym różne aparaty klasyczne konsekwentnie rzucają różne cienie.

Bohr próbował rozwiązać ów dylemat, głosząc, że te bardzo różne, wykluczające się wzajemnie zachowania nie są sprzeczne, lecz *komplementarne*. Są różnymi projekcjami tych samych, obiektywnie realnych rzeczy samych w sobie.

Gdzie to lokuje Bohra w kontekście Trzeciego Sądu Logicznego? To dobre pytanie. Chociaż jego prace w tej dziedzinie cechował haniebny brak jasności, a on sam był w znacznie mniejszym stopniu empirystą niż Heisenberg, po namyśle sądzę, iż słuszna okazałaby się konkluzja, że Bohr w zasadzie przyjął antyrealistyczną interpretację funkcji falowej. Co prawda, poparcie tego wniosku tylko jedną wypowiedzią Bohra (zwłaszcza że nie jest to nawet bezpośredni cytat) wydaje się pewnym nadużyciem, niemniej zawsze uważałem, że jest ona dość wymowna. Przytacza się mianowicie następujące słowa:

> Nie ma świata kwantowego. Jest tylko abstrakcyjny opis fizyki kwantowej. Błędem jest sądzić, że fizycy mają za zadanie odkryć, jaka jest natura. Fizyków interesuje, co możemy powiedzieć o naturze[80].

Zakładając, że to rzeczywiście jego słowa, dużo napisano o użytym przez niego zdaniu: „Nie ma świata kwantowego". Upatrywano w nim zaprzeczenie istnienia obiektywnej rzeczywistości (Pierwszy Sąd Logiczny). Uważam, że to bzdura, charakterystyczna dla dyskusji, które przesadnie upraszczają kwestie dotyczące „rzeczywistości". Znacznie większe znaczenie przypisuję stwierdzeniu: „Fizyków interesuje, co możemy powiedzieć o naturze". Cała wypowiedź Bohra dotyczy *odwzorowania*.

To dość subtelny rodzaj antyrealizmu. W rzeczywistości Bohr mówił o tym, że podlegamy fundamentalnym ograniczeniom za sprawą klasycznego charakteru naszej aparatury i naszych pomiarów, a także języka klasycznych fal i cząstek, którym opisujemy to, co widzimy. Dlatego dość bezcelowe jest spekulowanie o rzeczywistości lub, przeciwnie, o elementach „abstrakcyjnego opisu fizyki kwantowej", łącznie z funkcją falową, ponieważ nie mamy absolutnie żadnej możliwości odkrycia czegokolwiek na ich temat[81].

Heisenberg początkowo niechętnie odnosił się do wprowadzonego przez Bohra pojęcia komplementarności, które uznawało również słuszność opisu falowego, kojarzonego z jego rywalem Schrödingerem. Jako że ich debata stawała się coraz bardziej zażarta i przybierała charakter osobisty, na początku czerwca 1927 roku do instytutu Bohra w Kopenhadze wezwano Wolfganga Pauliego, by załagodził sytuację i wynegocjował pokój. Z pomocą Pauliego Bohr i Heisenberg przystali na niełatwą ugodę.

Do kluczowych elementów powstałej interpretacji mechaniki kwantowej zaliczały się: pojęcie komplementarności fali i cząstki Bohra, zasada nieoznaczoności oraz prawdopodobieństwo kwantowe Borna. Nie trzeba mówić, że jeśli chodzi o tych fizyków, to mechanika kwantowa w 1927 roku była już teorią kompletną i nie istniało nic więcej, co można byłoby do niej dodać.

Co było godne uwagi, to gorliwość, z jaką wyznawcy tej nowej kwantowej ortodoksji przyjęli i głosili swoją nową ewangelię. Heisenberg mówił i pisał o „Kopenhagener Geist der Quantentheorie", „kopenhaskim duchu" teorii kwantowej[82]. Interpretacja ta stała się znana jako interpretacja kopenhaska, aczkolwiek, ściśle rzecz biorąc, nigdy tak naprawdę nie było jednej „interpretacji", pod którą podpisaliby się wszyscy jej zwolennicy. Podobnie jak w przypadku świętej księgi, każdy z nich miał własny pogląd na to, jaki sens mają zawarte w niej zapisy.

Einstein w ogóle jej nie lubił.

Szykowała się wielka debata na temat kwantowego odwzorowania rzeczywistości. Doszło do niej podczas piątego kongresu Solvaya w Brukseli, jednego z serii międzynarodowych kongresów fizycznych tylko dla zaproszonych gości, finansowanego przez bogatego przemysłowca i filantropa Ernesta Solvaya. Po raz pierwszy protagoniści mieli okazję spotkać się w jednym miejscu, twarzą w twarz. Born i Heisenberg przedstawili wspólny wykład, oświadczając, że mechanika kwantowa jest kompletną teorią, „której fundamentalne założenia fizyczne i matematyczne nie wymagają już żadnych modyfikacji"[83]. Następnie Schrödinger wygłosił wykład o mechanice falowej. A po przerwie, która pozwoliła uczestnikom

wziąć udział w konkurencyjnej konferencji zorganizowanej w Paryżu, Bohr miał wykład o komplementarności.

Wówczas ze swojego miejsca podniósł się Einstein, zgłaszając zastrzeżenia. Jego zaniepokojenie wzbudziły implikacje wynikające ze zdarzeń fizycznych, które obecnie interpretowalibyśmy jako kolaps funkcji falowej. Zerknij jeszcze raz na rysunek 5. Przed pomiarem funkcja falowa elektronu rozkłada się na całym ekranie, z prawdopodobieństwem znalezienia go w dowolnym miejscu, w którym kwadrat funkcji falowej ma wartość niezerową – rysunek 5a. Po pomiarze dowiadujemy się, że elektron znajduje się „tutaj", w jednym miejscu – rysunek 5b. Jednakże, wskazał teraz Einstein, *jednocześnie* dowiedzieliśmy się, że elektron z całą pewnością *nie* znajduje się „tam", a „tam" oznacza dowolny punkt ekranu, w którym mogliśmy się go spodziewać.

Einstein dowodził, że „zakłada to istnienie jakiegoś całkiem osobliwego mechanizmu działania na odległość, które powstrzymuje falę, rozłożoną w sposób ciągły w przestrzeni, przed spowodowaniem działania w dwóch różnych miejscach ekranu"[84]. W przyszłości szerzej znane stanie się użyte przez niego sformułowanie „upiorne działanie na odległość". Cząstka, która zgodnie z funkcją falową jest w jakiś sposób rozproszona w dużej przestrzeni, ulega natychmiastowej lokalizacji. Wydaje się, że akt pomiaru momentalnie zmienia stan fizyczny układu, również daleko od punktu, w którym go przeprowadzono. Einstein czuł, że tego rodzaju działanie na odległość łamie jeden z kluczowych postulatów jego szczególnej teorii względności: żadne działanie ani informacja powstająca w wyniku działania fizycznego nie może przenosić się z prędkością większą niż prędkość światła. Każdy proces fizyczny, który zachodzi natychmiast na dużych odległościach, stanowi pogwałcenie tego postulatu.

Zauważmy od razu, że całe to gadanie o działaniu fizycznym zdradza fakt, iż wspomniane obawy dotyczą *realistycznej* interpretacji funkcji falowej, w duchu Trzeciego Sądu Logicznego. To nie znaczy, że Einstein chciał przypisać funkcji falowej realność w taki sam sposób, w jaki zrobił to Schrödinger (wkrótce przekonamy się, że ich poglądy były całkiem różne). Jest ważne, by

zrozumieć, że debata Bohra z Einsteinem od początku wiązała się ze zderzeniem *postaw filozoficznych*. Poważnie ryzykując nadmierne uproszczenie, można powiedzieć, że było to starcie między realizmem i antyrealizmem, akceptacją i odrzuceniem Trzeciego Sądu Logicznego.

Za szczególnie fascynujący uważam fakt, że Einstein atakował stanowisko, którego Bohr tak naprawdę nie bronił. Jednak rozpatrując fizyczne *konsekwencje* swoich realistycznych założeń, Einstein próbował wskazać nieścisłości w tym, co szybko stawało się standardową lub domyślną interpretacją mechaniki kwantowej.

Interpretacja kopenhaska w ujęciu Bohra obliguje nas do powstrzymania się przed pytaniem: *Jak naprawdę natura to robi?* Niczym personel służb ratunkowych na miejscu tragicznego wypadku Bohr radzi nam iść dalej, bo nie ma na co patrzeć. I tu jest pies pogrzebany: co jest celem teorii naukowej, jeśli nie wsparcie naszego *rozumienia* świata fizycznego? My *chcemy* gapić się na rzeczywistość, zaspokajając naszą ciekawość. W mechanice kwantowej można to robić jedynie wtedy, gdy potraktujemy funkcję falową bardziej dosłownie i realistycznie.

Ciąg dalszy dyskusji nastąpił w jadalni w Hôtelu Britannique, gdzie zatrzymali się uczestnicy kongresu. Otto Stern opisał, co się wówczas działo:

> Einstein schodził na śniadanie i wyrażał swoje zastrzeżenia do nowej teorii; za każdym razem przedstawiał jakiś nowy, piękny eksperyment myślowy, z którego wynikało, że [teoria] jest błędna [...] Pauli i Heisenberg, którzy tam byli, nie zwracali na to większej uwagi, „ach was, das stimmt schon, das stimmt schon" [ach, dobrze, wszystko się zgadza, wszystko się zgadza]. Bohr natomiast starannie rozważał jego argumenty i wieczorem, gdy wszyscy byliśmy razem podczas kolacji, dokładnie wyjaśniał sprawę[85].

Einstein obmyślił wiele hipotetycznych testów lub *Gedanken-experimente* (eksperymentów myślowych), opartych na domniemaniu słuszności Trzeciego Sądu Logicznego. Chodziło w nich

o zasady, nie należało traktować ich zbyt dosłownie jako eksperymenty praktyczne, które można przeprowadzić w laboratorium.

Zaczął od prób wykazania nieścisłości w interpretacji zasady nieoznaczoności, ale każdy atak był zręcznie odpierany przez Bohra. Niemniej pod presją nieustannych wypadów Einsteina baza kontrargumentów Bohra uległa nieznacznemu przesunięciu. Bohr zmuszony był wycofać się na pozycję, zgodnie z którą pomiary z wykorzystaniem klasycznej aparatury są po prostu zbyt „niezdarne", co znaczy, że ograniczenia dotyczą raczej tego, co możemy zmierzyć, niż tego, czego możemy się dowiedzieć. Było to takie samo stanowisko jak to, za które wcześniej w tymże roku Bohr krytykował Heisenberga.

W oczach większości zgromadzonych w Brukseli fizyków tego dnia zwycięstwo należało do Bohra. Jednak Einstein uparcie nie dawał się przekonać, a w jego głowie kiełkowały już znacznie poważniejsze wyzwania.

„Podczas następnego spotkania z Einsteinem na kongresie Solvaya w 1930 roku – pisał Bohr kilka lat później – nasze dyskusje przybrały zgoła dramatyczny obrót"[86].

Załóżmy, powiedział Einstein, że zbudujemy aparat składający się z pudełka, które zawiera zegar połączony z przysłoną. Przysłona zasłania niewielki otwór w ściance. Napełniamy pudełko fotonami i je ważymy. Po z góry ustalonym i dokładnie znanym czasie zegar uruchamia przysłonę, która otwiera się na czas dostatecznie krótki, by pozwolić uciec tylko jednemu fotonowi. Przysłona się zamyka. Ponownie ważymy pudełko i posługując się wzorem $E = mc^2$ oraz różnicą masy, wyznaczamy dokładną energię fotonu, który uciekł. Tym sposobem zmierzyliśmy zarówno energię, jak i przedział czasowy, w którym foton został uwolniony z pudełka, z dokładnością stojącą w sprzeczności z zasadą nieoznaczoności czasu i energii. To eksperyment Einsteina z „pudełkiem fotonów".

Bohr był dość zaskoczony i nie od razu znalazł rozwiązanie. Spędził bezsenną noc, szukając skazy w rozumowaniu Einsteina, która, był tego pewien, musiała istnieć. Do śniadania następnego dnia znalazł odpowiedź.

Narysował na tablicy orientacyjny, pseudorealistyczny szkic aparatu, który byłby potrzebny do wykonania pomiarów w sposób opisany przez Einsteina (rysunek 9). Przedstawione na rysunku pudełko jest zawieszone na sprężynie i wyposażone we wskazówkę, dzięki której można odczytać jego dokładne położenie na przytwierdzonej do podpory podziałce. Do pudełka doczepiony jest mały ciężarek, którego zadaniem jest ustawienie wskazówki dokładnie w zerze. Wewnątrz pudełka widoczny jest połączony z przysłoną mechanizm zegarowy.

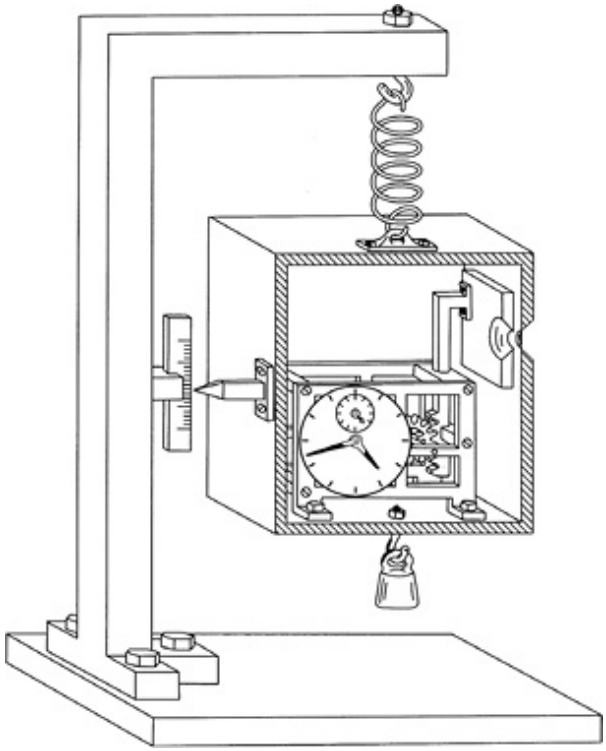
Po uwolnieniu fotonu mały ciężarek zostaje zamieniony na inny, nieznacznie cięższy. Wyrównuje on utratę wagi spowodowaną ucieczką fotonu, dzięki czemu wskazówka ponownie staje na zerze. Zakładamy, że wymagany do tego ciężar można wyznaczyć niezależnie, z dowolnie dużą dokładnością. Różnica tych dwóch ciężarów, konieczna, by zrównoważyć pudełko, daje masę, a więc energię uwolnionego fotonu, tak jak dowodził Einstein.

Na razie wszystko w porządku.

Teraz Bohr zwrócił uwagę na pierwsze ważenie, przed ucieczką fotonu. Oczywiście, zegar zaprogramowano w taki sposób, żeby otworzył przysłonę po upływie z góry określonego czasu, i pudełko zostaje zapieczętowane. Nie możemy patrzeć na zegar, ponieważ wiąże się to z wymianą fotonów – a więc energii – między pudełkiem a światem zewnętrznym.

Trzeba dobrze dobrać ciężarek, który obciąży pudełko w taki sposób, by wskazówka stanęła na zerze. Jednak w celu dokonania precyzyjnego pomiaru położenia wskazówki na skali trzeba ją oświetlić – musimy ją widzieć. Tymczasem aparat ma być nadzwyczaj czuły – położenie pudełka powinno zmienić się wskutek uwolnienia *jednego* fotonu. Można więc się spodziewać, że pod wpływem odbijających się od podziałki fotonów pudełko będzie podskakiwało w niedający się przewidzieć sposób. Możemy zwiększyć dokładność pomiaru *średniego* położenia wskazówki, dając sobie dużo czasu na przeprowadzenie procedury zrównoważenia pudełka. To zapewni nam konieczną precyzję pomiaru wagi pudełka, a skoro możemy przewidzieć taką potrzebę, da się ustawić zegar

w taki sposób, żeby otworzył przysłonę dopiero po zakończeniu procedury równoważenia pudełka.



Rysunek 9. „Pudełko z fotonami”, *Gedankenexperiment* Einsteina

Teraz czas na *coup de grâce* Bohra.

Zgodnie z ogólną teorią względności Einsteina zegar w polu grawitacyjnym podlega skutkom dylatacji czasu. Sam akt ważenia zegara zmienia sposób, w jaki odmierza on czas. Gdy pudełko podskakuje do góry, czas zwalnia swój bieg. Gdy zjeżdża w dół, czas przyspiesza. Skoro więc pudełko w sposób nieprzewidywalny skacze w polu grawitacyjnym (wskutek aktu równoważenia jego wagi przez mierzenie położenia wskazówki), tempo, w jakim zegar odmierza czas, ulega nieprzewidywalnym zmianom. Wprowadza to niepewność określenia czasu otwarcia przysłony, która zależy od czasu trwania procedury równoważenia pudełka. Im dłużej trwa procedura (z im większą dokładnością zmierzymy energię fotonu), tym większa jest niepewność określenia dokładnego momentu uwolnienia fotonu.

Bohr wykazał, że iloczyn niepewności pomiaru energii i czasu dla pudełka z fotonami w pełni zgadza się z zasadą nieoznaczoności.

Mimo że eksperyment z pudełkiem z fotonami zapoczątkował serię artykułów zawierających rozważania za i przeciw słuszności kontrargumentu Bohra, Einstein przyznał, iż odpowiedź Bohra wydaje się „wolna od sprzeczności", niemniej w jego opinii nadal kryje w sobie „pewne nierozsądne punkty"[87]. Okrzyknięto to wówczas wielkim triumfem Bohra i interpretacji kopenhaskiej. Bohr wykorzystał przeciw Einsteinowi jego własną ogólną teorię względności.

Zauważ jednak, że po raz kolejny Bohr zmuszony był bronić nienaruszalności zasady nieoznaczoności, posługując się argumentami opartymi na nieuchronnym i znacznym *zaburzeniu* obserwowanego układu kwantowego. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że nie da się tego obejść. Z pewnością dowolny pomiar zawsze będzie obejmował oddziaływania, których skala jest co najmniej tak duża jak poddawane pomiarom zjawiska zachodzące w układzie kwantowym. Jak można byłoby uniknąć tych powodowanych niezdarnością zakłóceń?

Einstein postanowił skupić się w swoich wyzwaniach na czymś innym. Zamiast dowodzić, że mechanika kwantowa – a w szczególności zasada nieoznaczoności – jest *niespójna*, zaczął szukać paradoksu logicznego, który będzie wynikał z czegoś, co postrzegał jako *niezupełność* teorii. Choć minęło kolejnych pięć lat, Bohr był zupełnie nieprzygotowany na kolejny ruch Einsteina.

Może wydawało się to niemożliwe, ale Einstein musiał znaleźć sposób na to, by opartą na zaburzeniach obronę Bohra przedstawić albo jako nieistotną, albo jako niedopuszczalną. Oznaczało to zaaranżowanie takiej sytuacji fizycznej, w której zasadniczo możliwe byłoby faktyczne zdobycie wiedzy o stanie fizycznym układu kwantowego bez jakiegokolwiek zaburzania go. Pracując z dwoma młodymi teoretykami, Borisem Podolskim i Nathanem Rosenem, Einstein wymyślił nowe wyzwanie, które było niewiarygodnie sprytne. Znaleźli sposób, by zrobić coś pozornie niemożliwego.

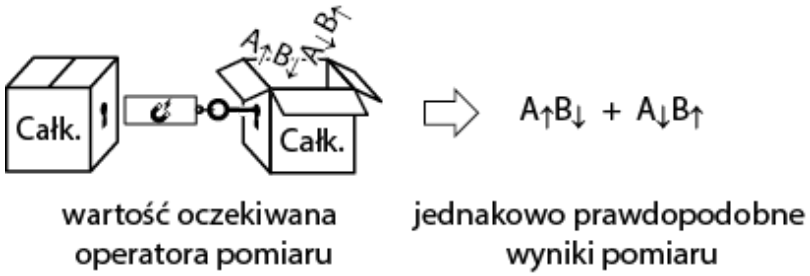
Wyobraź sobie sytuację, w której dwie cząstki oddziałują ze sobą, po czym oddalają się od siebie. Tymi cząstkami mogą być na przykład fotony, emitowane szybko jeden po drugim przez atom, albo elektrony, albo atomy. Dla wygody oznaczymy te cząstki jako

A i B. Dla naszych celów wystarczy, gdy założymy, że w wyniku działania jakiegoś prawa zachowania te dwie cząstki znajdują się w *przeciwstawnych* stanach fizycznych. Naprawdę nie ma znaczenia, jakie to będą stany, zatem nazwijmy je „w górę", co oznaczymy jako ↑, i „w dół", co oznaczymy symbolem ↓. Wyobraźmy więc sobie proces fizyczny, w którym powstaje para cząstek kwantowych – A i B – w stanach ↑ i ↓, przy czym gdy A jest w stanie ↑, B musi być w stanie ↓, natomiast, gdy A jest w stanie ↓, B musi być w stanie ↑.

Oto sedno problemu. Zgodnie z mechaniką kwantową poprawny sposób opisu tego rodzaju sytuacji polega na wykorzystaniu jednej funkcji falowej, która zawiera *obydwie* cząstki i *obydwa* możliwe wyniki. O takiej parze cząstek powiemy, że są *splątane*.

Postępując zgodnie z regułami matematycznymi, zapisujemy tę „całkowitą funkcję falową" wzorem, który wyrażamy jako superpozycję funkcji falowych obydwu możliwych sytuacji. Czyniąc to, jesteśmy zobowiązani uwzględnić udział funkcji falowej dla A w stanie ↑ i A w stanie ↓, a także B w stanie ↑ i B w stanie ↓. Jednak nasze prawo zachowania jawnie wyklucza możliwość zaobserwowania par, w których cząstki A i B są obydwie w stanie ↑ albo obydwie w stanie ↓. W związku z tym zostaje nam coś w tym rodzaju:

Załóżmy teraz, że cząstki A i B rozdzielają się i oddalają od siebie na dużą odległość. Przeprowadzamy na każdej z nich pomiar, żeby się dowiedzieć, w jakim stanie się znajdują. Ponieważ jest to pomiar na całkowitej funkcji falowej dwóch cząstek, zmuszeni jesteśmy przedstawić go w kategoriach wartości oczekiwanej operatora pomiaru działającego na całkowitą funkcję falową:



Zauważamy, że wyniki $A_\uparrow B_\downarrow$ i $A_\downarrow B_\uparrow$ są jednakowo prawdopodobne. Oczywiście w każdym pomiarze będziemy obserwować tylko jeden wynik, analogicznie do rejestrowania jednej plamki, gdy przez dwie szczeliny przechodzą elektrony, po jednym naraz. Wobec tego w interpretacji realistycznej musimy założyć, że całkowita funkcja falowa ulega kolapsowi, pozwalając na zanotowanie tylko jednego wyniku, *albo* $A_\uparrow B_\downarrow$, *albo* $A_\downarrow B_\uparrow$, tak że w serii pomiarów przeprowadzonych na identycznie przygotowanych układach uzyskamy 50 procent przypadków $A_\uparrow B_\downarrow$ i 50 procent przypadków $A_\downarrow B_\uparrow$.

Teraz załóżmy, że przeprowadzamy pomiar na cząstce A i odkrywamy, że znajduje się ona w stanie $\uparrow$. *Musi* to oznaczać, że całkowita funkcja falowa uległa kolapsowi, zostawiając cząstkę B w stanie $\downarrow$. Podobnie jeśli odkryjemy, że cząstka A znajduje się w stanie $\downarrow$, to musi oznaczać, że całkowita funkcja falowa uległa kolapsowi, zostawiając cząstkę B w stanie $\uparrow$. Nie ma innych możliwych wyników.

Funkcja falowa odnosi się jedynie do prawdopodobieństwa uzyskania takiego wyniku lub innego, zasadniczo więc rzecz biorąc, nie możemy się zawczasu dowiedzieć, czy pomiar cząstki A da wynik $\uparrow$, czy $\downarrow$. Nie ma to jednak znaczenia, znając bowiem stan cząstki A, możemy z całą pewnością określić stan cząstki B, mimo że nie poddaliśmy jej pomiarowi. Inaczej mówiąc, *możemy poznać stan cząstki B bez zaburzania jej w jakikolwiek sposób*. Musimy jedynie założyć, że dowolny pomiar przeprowadzany na cząstce A w żaden sposób nie wpływa na cząstkę B i jej nie zaburza; może ona znajdować się w dowolnie dużej odległości, powiedzmy w centrum

Wszechświata. Dochodzimy do wniosku, że stan cząstki B (a więc, logicznie rozumując, również stan cząstki A) *cały czas musiał być określony*.

Szatański pomysł, nieprawdaż?

W swoim artykule z 1935 roku, zatytułowanym *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* (*Czy kwantowomechaniczny opis rzeczywistości fizycznej może być uznany za kompletny?*) Einstein, Podolsky i Rosen (EPR) zaproponowali silnie zakorzenioną w filozofii definicję rzeczywistości fizycznej:

> Jeżeli nie zaburzając w żaden sposób układu, możemy z całą pewnością (czyli z prawdopodobieństwem równym jedności) przewidzieć wartość wielkości fizycznej, to istnieje taki element rzeczywistości fizycznej, który odpowiada tej wielkości fizycznej[88].

Łatwo zobaczyć, co EPR próbowali zrobić. Skoro funkcja falowa jest interpretowana realistycznie, zgodnie z Trzecim Sądem Logicznym, to uzasadnione jest, że realne powinny być również opisywane przez nią własności – stany fizyczne cząstek A i B. Tak najwyraźniej nie jest. Nie ma w tym sformułowaniu niczego, co opisywałoby te stany *przed* dokonaniem pomiaru na cząstce A, teoria nie może być więc zupełna.

Alternatywą jest zaakceptowanie faktu, że rzeczywistość stanu cząstki B określona jest przez rodzaj pomiaru, jaki *wybierzemy*, by przeprowadzić go na zupełnie innej cząstce, znajdującej się w dowolnie dużej odległości. Cokolwiek naszym zdaniem zachodzi, wydaje się, że sugeruje „upiorne działanie na odległość", co kłóci się ze szczególną teorią względności. Jak argumentowali EPR: „Nie można oczekiwać, by jakakolwiek rozsądna definicja rzeczywistości na to pozwalała"[89].

Jeszcze przed ukazaniem się drukiem publikacji EPR szczegóły najnowszego wyzwania zostały zrelacjonowane na łamach „The New York Timesa" w artykule zatytułowanym *Einstein atakuje teorię kwantową*. Zawierał on niespecjalistyczne podsumowanie głównych

argumentów, z obszernymi cytatami wypowiedzi Podolskiego, który, jak mogłoby się wydawać, był najważniejszym autorem pracy.

Wiele wskazuje na to, że Einstein żałował później użytych w artykule EPR sformułowań oraz natury zastosowanych w nim argumentów, zwłaszcza kryterium rzeczywistości. Tym bardziej, być może, że zaprezentowane przez EPR główne wyzwanie nie wymagało zastosowania tego (ani jakiegokolwiek innego) kryterium, nawet jeśli opierało się na domniemaniu, iż cokolwiek sądzimy o rzeczywistości, z założenia jest ona *lokalna*, co znaczy, że kiedy cząstki A i B oddalą się jedna od drugiej, z założenia istnieją niezależnie od siebie nawzajem. Einstein potępił artykuł w „New York Timesie" i wzbudzony przezeń rozgłos.

Niemniej jednak nowe wyzwanie ze strony Einsteina wywołało w niewielkiej społeczności fizyków kwantowych falę uderzeniową. Spadło na Bohra niczym „grom z jasnego nieba"[90]. Pauli był wściekły. Paul Dirac zawołał: „Teraz musimy zaczynać wszystko od nowa, bo Einstein udowodnił, że to nie działa!"[91].

Odpowiedź Bohra, gdy pojawiła się wkrótce potem, nieuchronnie uderzyła w kryterium rzeczywistości jako najsłabszy punkt dowodu. Argumentował on, że zastrzeżenie „nie zaburzając w żaden sposób układu" w gruncie rzeczy jest niejednoznaczne, ponieważ układ kwantowy pozostaje pod wpływem wielu różnych czynników, które definiują jego przyszłe zachowania. Innymi słowy, musimy radzić sobie z elementami *rzeczywistości empirycznej* zdefiniowanej nie przez układ kwantowy w ogóle, ale przez układ kwantowy w kontekście pomiarów, jakie na nim przeprowadzamy, i aparatury, jakiej używamy. To czynniki, które narzucają nam oczekiwania wobec spodziewanego wyniku obserwacji. Błąd EPR krył się w przypuszczeniu, że funkcja falowa powinna być interpretowana realistycznie, a „upiorne działanie na odległość" to nic innego jak konsekwencja tego błędu. Po prostu nie pytaj, jak natura to robi, bo tu naprawdę nie ma nic do oglądania.

Einsteinowi udało się przynajmniej zmusić Bohra do porzucenia obrony odwołującej się do zaburzeń i zajęcia bardziej zdecydowanej postawy antyrealistycznej. Wydaje się, że ta część społeczności

fizyków, dla której było to istotne, zaakceptowała fakt, iż Bohr swoją odpowiedzią postawił sprawę jasno.

Wkrótce po ukazaniu się artykułu EPR Schrödinger napisał do Einsteina z gratulacjami. W swoim liście podkreślił, co tak naprawdę jest głównym wyzwaniem. Interpretowana realistycznie, opisująca dwie cząstki całkowita funkcja falowa z konieczności jest „nielokalna". Jest rozłożona w taki sam sposób, w jaki w doświadczeniu z dwiema szczelinami funkcja falowa elektronu rozkłada się na ekranie. Instynkt każe nam sobie wyobrażać, że odsunięte od siebie na dużą odległość cząstki A i B są rozdzielone. Są odrębnymi, istniejącymi niezależnie od siebie, „lokalnie realnymi" cząstkami. Mechanika kwantowa nie oferuje absolutnie żadnego wyjaśnienia, w jaki sposób przechodzimy z jednej sytuacji w drugą.

Einstein odpowiedział z entuzjazmem i z trwającej między nimi latem 1935 roku korespondencji stopniowo zaczęło wyłaniać się kolejne wyzwanie wobec teorii, która do tej pory stała się już ortodoksyjną interpretacją kopenhaską.

Najpierw Einstein musiał uporać się z naleganiami Schrödingera, by funkcję falową interpretować jako opis realnej „fali materii". Choć nie potrafił ująć tego precyzyjnie, Einstein wolał myśleć o funkcji falowej w kategoriach *statystycznych*. Własności gazu opisujemy za pomocą takich wielkości fizycznych, jak temperatura i ciśnienie. Jednak biorąc pod uwagę gaz jako zbiór atomów, możemy posłużyć się klasycznymi teoriami rozwiniętymi przez Ludwiga Boltzmanna i Jamesa Clerka Maxwella, żeby wyprowadzić wyrażenia opisujące temperaturę i ciśnienie jako wynik *uśrednienia statystycznego* po zakresach ruchów atomów. W tym przypadku posługujemy się jedynie statystyką i prawdopodobieństwem, ponieważ nie mamy możliwości śledzenia ruchów każdego indywidualnego atomu w gazie. Oczywiście możemy nie być w stanie opisać tych ruchów inaczej niż w kategoriach statystycznych, ale to nie oznacza, że atomy (lub ich ruchy) nie są rzeczywiste.

Realistyczna interpretacja funkcji falowej Einsteina bardzo różniła się od interpretacji Schrödingera. Jeżeli, mimo wszystko, prawdopodobieństwo kwantowe jest prawdopodobieństwem statystycznym, zrodzonym z naszej niewiedzy, to musi istnieć jakaś

głębsza, leżąca u podstaw wszystkiego rzeczywistość, której pozostajemy nieświadomi, podobnie jak za temperaturą i ciśnieniem gazu kryją się ruchy atomów. Do tego zmierzał Einstein: skoro ta fundamentalna rzeczywistość nie występuje w mechanice kwantowej, to nie można jej uznać za teorię kompletną. Einstein nie był w stanie sprecyzować, czym dokładnie byłaby ta leżąca u podstaw rzeczywistość, a EPR w swoim artykule skomentowali tę konkluzję słowami: „pozostawiamy otwartą kwestię tego, czy ów opis istnieje, czy nie. Wierzymy jednak, że taka teoria jest możliwa”[92]. Więcej do powiedzenia na ten temat będę miał w następnym rozdziale.

Proponowana przez Schrödingera interpretacja funkcji falowej nie mogła być poprawna i Einstein w swoim liście z 8 sierpnia 1935 roku próbował mu to wytłumaczyć. Zaproponował mianowicie, żeby Schrödinger wyobraził sobie ładunek prochu, który w ciągu roku może w każdej chwili spontanicznie wybuchnąć. Na początku roku proch jest opisywany przez funkcję falową. Jak jednak należałoby opisać sytuację na przestrzeni roku? Dopóki nie spojrzymy, żeby sprawdzić, co się stało, dopóty możemy traktować funkcję falową jako superpozycję funkcji falowych, z których jedna opisuje wybuch prochu, a druga brak wybuchu. Jak pisze Einstein:

> Żadna sztuka interpretacyjna nie zdoła tej [funkcji falowej] przekształcić w satysfakcjonujący opis rzeczywistego stanu rzeczy, ponieważ w rzeczywistości nie ma niczego pośredniego między prochem, który wybuchł, a tym, który nie wybuchł[93].

Schrödinger ostatecznie ustąpił i zaczął podzielać poglądy Einsteina. Jednak eksperyment z wybuchającym prochem dał mu do myślenia. Skoro w matematycznym sformułowaniu mechaniki kwantowej nie ma niczego, co wyjaśniałoby kolaps funkcji falowej, to po co zakładać, że dzieje się to na poziomie kwantowym? Dlaczego nie wyobrazić sobie, że splątanie wspina się po łańcuchu pomiarów aż do poziomu aparatury klasycznej? W swojej odpowiedzi z 19 sierpnia naszkicował inny eksperyment myślowy, który miał zyskać wieczną sławę:

> W stalowej komorze zamknięty jest licznik Geigera wraz z niewielką ilością uranu, tak małą, że można się z jednakowym prawdopodobieństwem spodziewać, iż w ciągu następnej godziny dojdzie do rozpadu zarówno jednego atomu, jak i żadnego. Przekaźnik wzmacniający sygnał gwarantuje, że pierwszy rozpad atomu spowoduje stłuczenie niewielkiej buteleczki z kwasem pruskim. W tej samej stalowej komorze – to okrutne – zamknięty jest również kot. Zgodnie z [funkcją falową] dla całego układu po godzinie, *sit venia verbo*, [przepraszam za wyrażenie], żywy i martwy kot są rozmazane w równej mierze[94].

To słynny paradoks kota Schrödingera.

Einstein w pełni się z nim zgadzał. Całkowita funkcja falowa zawierająca udziały funkcji falowych kota żywego i kota martwego to z całą pewnością fikcja. Lepiej podjąć próbę znalezienia realistycznej interpretacji funkcji falowej w kategoriach statystycznych. Gdyby to doświadczenie skopiować, wypełniając laboratorium setkami komór, z których każda zawierałaby kota, to przewidujemy, że po godzinie w pewnej liczbie komór (z prawdopodobieństwem wywnioskowanym z funkcji falowej) kot będzie martwy[95]. Licznik Geigera w każdej z komór kliknie lub nie kliknie. Jeśli kliknie, aktywowany jest przekaźnik, rozbita butelka uwalnia kwas pruski i kot ginie. Jeśli nie kliknie, kot żyje nadal. Nigdzie w tym doświadczeniu nie ma kota zawieszonego w jakimkolwiek dziwacznym czyśćcu.

Schrödinger traktował paradoks kota raczej jako żartobliwy przytyk do ewidentnej niezupełności mechaniki kwantowej niż bezpośrednie wyzwanie rzucone interpretacji kopenhaskiej. Wydaje się, że nie uzyskał od Bohra żadnej formalnej odpowiedzi. Napisał do niego 13 października 1935 roku, by go powiadomić, że jego zdaniem odpowiedź Bohra na wyzwanie EPR była ciut niezadowalająca. Niewątpliwie, dowodził, Bohr przeoczył możliwość, że w przyszłości postęp nauki może podważyć zapewnienie, iż aparaturę pomiarową należy zawsze traktować w kontekście fizyki klasycznej. Bohr odpowiedział krótko, że gdyby służyła ona jako instrument pomiarowy, po prostu nie mogłaby mieć wymiarów kwantowych.

W każdym razie do tego czasu społeczność fizyków poszła do przodu i prawdopodobnie nie miała większej ochoty na niekończącą się debatę filozoficzną, która zdaniem większości została już zadowalająco rozstrzygnięta przez Bohra.

Tymczasem „Kopenhagener Geist" został sformalizowany i bezpiecznie schowany w bardzo matematycznej strukturze mechaniki kwantowej. Teoria wyłoniła się z całkowicie chaotycznej sekwencji odkryć, które wymagały ukrytego łamania reguł matematyki, więcej niż kilku nieuzasadnionych założeń i sporadycznych konceptualnych aktów wiary. W pierwszych latach jej istnienia przeprawa przez Morze Odwzorowania był trudna. Następnie pojawiło się wyzwanie, jakim było pogodzenie ze sobą dwóch wyraźnie różnych podejść do mechaniki kwantowej, opracowanych przez Heisenberga i Schrödingera. To Schrödinger osobiście wykazał, że obydwa podejścia są równoważne matematycznie.

W późnych latach dwudziestych ubiegłego wieku Paul Dirac i John von Neumann, niezależnie od siebie, próbowali jakoś uporządkować tę teorię, ustanawiając jedną, spójną formalnie strukturę matematyczną mechaniki kwantowej. Ich praca została podsumowana w dwóch książkach: *The Principles of Quantum Mechanics* Diraca miała swoje pierwsze wydanie w 1930 roku, natomiast *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* von Neumanna została opublikowana w Niemczech w 1932 roku. Obydwaj wybrali nieco inne podejście, z tym że von Neumann krytycznie odnosił się do niektórych aspektów matematyki Diraca. Niemniej to właśnie z jego propozycji wyłoniła się struktura, której naucza się studentów obecnie.

Von Neumann był studentem wielkiego matematyka Davida Hilberta. Podczas odbywającego się w 1900 roku w Paryżu Międzynarodowego Kongresu Matematyków Hilbert wygłosił wykład, w którym nakreślił długą listę zagadnień, jakie jego zdaniem będą zajmowały następne pokolenie czołowych matematyków. Lista stała się znana jako *problemy Hilberta*. Szósty z nich dotyczył metod matematycznych w fizyce. Hilbert dowodził, że ważnym celem przyszłych matematyków będzie traktowanie nauk fizycznych w taki

sam sposób jak geometrii. Oznacza to oparcie fizyki na zbiorze *aksjomatów*.

Aksjomaty to oczywiste prawdy, które są przyjmowane bez dowodu i stanowią fundament wyprowadzanej z nich struktury matematycznej. Dowód poprawności aksjomatów kryje się w spójności tej struktury i prawdziwości twierdzeń, które można z nich wydedukować. Metoda aksjomatyczna Hilberta polegała na niemal patologicznym dążeniu do wyeliminowania z matematyki wszelkich przejawów rozumowania intuicyjnego, ponieważ, jak argumentował, jest ona zbyt ważną dziedziną, by jej prawdy nie były „głęboko zakorzenione". Tego rodzaju żądanie rygoru matematycznego i spójności, zastosowane w fizyce, nieuchronnie doprowadziło do kłopotliwego przyrostu mętnego symbolizmu i abstrakcyjności. Pauli w swojej recenzji *Principles of Quantum Mechanics* Diraca ostrzegł, że zastosowany przez niego abstrakcyjny formalizm i skupianie się na matematyce kosztem fizyki kryje w sobie „pewne niebezpieczeństwo, że teoria ucieknie od rzeczywistości"[96]. Dla kogoś o przeciętnej inteligencji, lecz bez formalnego wykształcenia matematycznego lub wiedzy z zakresu logiki pełne zrozumienie aspektów współczesnej fizyki stało się niemal niemożliwe.

Prawdę mówiąc, zapoznaliście się już z kilkoma pierwszymi aksjomatami mechaniki kwantowej, o których czytaliście w rozdziale 1. Zaczynamy od...

> **Aksjomat Pierwszy:** *Stan układu kwantowomechanicznego jest w pełni zdefiniowany przez jego funkcję falową.*

Inaczej mówiąc, mechanika kwantowa jest zupełna matematycznie, co w istocie jest konieczne, jeśli ma ona służyć jako fundamentalna teoria fizyczna. To tyle, gdy chodzi o Einsteina. Określam ten aksjomat mianem „nie ma tu na co patrzeć".

> **Aksjomat Drugi:** *Obserwable w mechanice kwantowej są odwzorowywane przez określoną klasę operatorów matematycznych.*

I znowu nie mam zamiaru wyjaśniać ci szczegółowo, co oznacza użyte tu sformułowanie „określona klasa”. Wystarczy, gdy będziesz wiedzieć, że operatory te doskonale nadają się do zadania, jakim jest ekstrahowanie wartości obserwabli z funkcji falowej. Nazywam go w myślach aksjomatem „odpowiedni zbiór kluczy”. Chcąc dostać się do obserwabli, na przykład pędu czy energii, musimy otworzyć pudełko symbolizowane przez funkcję falową. Różne obserwable wymagają wyjęcia z odpowiedniego zbioru właściwego klucza.

> **Aksjomat Trzeci:** *Średnia wartość obserwabli dana jest wartością oczekiwaną odpowiadającego jej operatora.*

Ten aksjomat mówi nam, jak używać kluczy. Myślę o nim jako o aksjomacie „otwórz pudełko”. Stosujemy ten przepis, by dostać się do samych obserwabli.

Jeżeli mechanika kwantowa ma być teorią fizyczną, która będzie dostarczała pożytecznych przewidywań, musimy oczywiście wiedzieć, jak ją stosować:

> **Aksjomat Czwarty:** *Prawdopodobieństwo, że pomiar zapewni określony wynik, wywodzi się z kwadratu odpowiedniej funkcji falowej*[97]*.*

To tak zwana reguła Borna[98]. Ewentualnie, jeśli chcesz, możesz myśleć o niej jako o aksjomacie: „co możemy otrzymać?”. Zauważ, że kiedy zastosujemy ją do superpozycji z co najmniej dwoma lub więcej możliwymi wynikami, reguła nie mówi, co *otrzymamy* w jakimkolwiek indywidualnym pomiarze.

W skład podstawowej struktury wchodzi jeszcze jeden aksjomat, odnoszący się do sposobu, w jaki przewidujemy zmiany funkcji falowej w czasie:

> **Aksjomat Piąty:** *W układzie zamkniętym, niepodlegającym wpływom zewnętrznym, funkcja falowa ewoluuje w czasie zgodnie z zależnym od czasu równaniem Schrödingera.*

To znaczy, że raz ustanowiona funkcja falowa ewoluuje w sposób ciągły i przewidywalny, a jej własności w danej chwili są w pełni

zdeterminowane własnościami, które miała chwilę wcześniej. Pomyśl o funkcji falowej elektronu, która przechodząc przez dwie szczeliny, ewoluuje płynnie w czasie, formując „czoło fali”, a jego amplituda w wyniku interferencji zmienia się od wysokiej do niskiej lub zerowej, jak pokazano na rysunku 5a. To aksjomat „jak stamtąd znalazła się tutaj”.

Nie ma tu miejsca na ten rodzaj nieciągłości, który kojarzymy z procesem pomiaru. Jak rozumiał to von Neumann, akceptując Aksjomat Piąty, jesteśmy zmuszeni przyjąć kolejny (lecz powiązany z nim) aksjomat, w którym zakładamy, że funkcja falowa odpowiadająca superpozycji wielu możliwych wyników pomiaru ulega kolapsowi, dając tylko jeden z nich.

Oczywiście żadnej z tych rzeczy nie musimy nigdy robić w mechanice klasycznej.

Aksjomaty geometryczne Euklidesa dotyczą własności linii prostych, okręgów i kątów prostych i, moim zdaniem, spełniają kryterium oczywistej prawdy. Jednak gdy chodzi o aksjomaty mechaniki kwantowej, nic nie jest oczywiste. Wydaje mi się, że nie ma tu żadnej niespodzianki. Sformułowania mechaniki kwantowej są równie abstrakcyjne i mętne, jak geometria euklidesowa jest swojska.

Wspomniane aksjomaty pozostawiają całkowicie otwartą kwestię rzeczywistości lub funkcji falowej – w końcu to matematyka, nie filozofia. Myślę jednak, że przyda się odnotować, jak wiele podstawowych dogmatów interpretacji kopenhaskiej zostało wchłoniętych przez aksjomatyczną strukturę mechaniki kwantowej. O ile fakty empiryczne nigdy nie mogą być całkowicie oderwane od teorii koniecznej do ich interpretacji, o tyle teoria nigdy nie może być w pełni wolna od towarzyszących jej narodzinom prekoncepcji metafizycznych. Standardowe sformułowanie matematyczne mechaniki kwantowej nie jest całkiem neutralnym świadkiem w sporze, który miał rozgorzeć.

To wielka gra w teorie. Przyjrzyjmy się teraz, jak fizycy grali w tę grę na przestrzeni ostatnich mniej więcej dziewięćdziesięciu lat.

80 Cyt. za Aage Petersen, *The Philosophy of Niels Bohr*, „Bulletin of the Atomic Scientists" 1963, nr 19, s. 12.

81 Staranna analiza pism i wpływów filozoficznych Bohra sugeruje, że bliższa niż pozytywizm była mu tradycja znana jako *pragmatyzm*. Pragmatyzm, stworzony przez Charlesa Sandersa Peirce'a, ma wiele cech pozytywizmu w tym sensie, że obydwa kierunki zdecydowanie odrzucają metafizykę. Istnieją jednak między nimi różnice. Doktrynę pozytywistów możemy rozumieć jako: „zobaczyć znaczy uwierzyć": nasza wiedza sprowadza się do tego, co możemy zaobserwować empirycznie. Doktryna pragmatyków dopuszcza praktyczniejsze (czy też właśnie pragmatyczne) podejście: nasza wiedza nie jest ograniczona przez to, co możemy zobaczyć, ale przez to, co możemy *zrobić*. Zob. np. Dugald Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1987.

82 Werner Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, University of Chicago Press, Chicago 1930. Wznowiona w 1949 roku przez Dover Publications, Nowy Jork. Ten cytat pojawia się w przedmowie.

83 Max Born i Werner Heisenberg, *Quantum Mechanics*, „Proceedings of the Fifth Solvay Congress", 1928. Przekład angielski: Guido Bacciagaluppi i Antony Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge University Press, Cambridge 2009, s. 437.

84 Albert Einstein, *General Discussion*, „Proceedings of the Fifth Solvay Congress", 1928. Przekład angielski: Guido Bacciagaluppi i Antony Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads…*, op. cit., s. 488.

85 Otto Stern w wywiadzie przeprowadzonym przez Resa Josta, 2 grudnia 1961 roku. Cyt. za: Abraham Pais, op. cit., s. 447.

86 Niels Bohr w: Paul Arthur Schilpp (red.), *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, w: *Albert Einstein. Philosopher-scientist*, The Library of Living Philosophers, tom 1, Harper & Row, Nowy Jork 1959; pierwsze wydanie w 1949 roku, s. 224.

87 List Hendrika Casimira do Abrahama Paisa, 31 grudnia 1977 roku. Cyt. za: Abraham Pais, op. cit., s. 451.

88 Albert Einstein, Boris Podolsky i Nathan Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, „Physical Review" 1935, nr 47, s. 777–780. Artykuł został przedrukowany w: John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek (red.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton 1983, s. 138–141. Przytoczony cytat pojawia się na s. 138.

89 Albert Einstein, Boris Podolsky i Nathan Rosen, op. cit., także: John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek (red.), op. cit., s. 141.

90 Léon Rosenfeld, w: Stefan Rozenthal (red.), *Niels Bohr: His Life and Work as Seen by his Friends and Colleagues*, North-Holland, Amsterdam 1967, s. 114–136. Fragment przedrukowany w: John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek (red.), op. cit., s. 137 i 142–143. Niniejszy cytat pojawia się na s. 142.

91 Paul Dirac, wywiad z Nielsem Bohrem, 17 listopada 1962 roku, *Archive for the History of Quantum Physics*. Cyt. za: Mara Beller, *Quantum Dialogue*, University of Chicago Press, Chicago 1999, s. 145.

92 Albert Einstein, Boris Podolsky i Nathan Rosen, op. cit., także John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek, (red.), op. cit., s. 141.

93 Albert Einstein, list do Erwina Schrödingera, 8 sierpnia 1935 roku. Cyt. za: Arthur Fine, op. cit., s. 78.

94 Erwin Schrödinger, list do Alberta Einsteina, 19 sierpnia 1935 roku. Cyt. za: ibidem, s. 82–83.

95 A w konsekwencji w laboratorium pojawią się przedstawiciele organizacji opieki nad zwierzętami.

96 Wolfgang Pauli, [recenzja książki Paula Diraca *The Principles of Quantum Mechanics*], „Die Naturwissenschaften" 1931, nr 19, s. 188–189, cyt. za: Helge Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge 1990, s. 79.

97 Jeszcze raz, dla jasności, przypomnijmy z rozdziału 1, że w rzeczywistości posługujemy się kwadratem modułu funkcji falowej.

98 Ściśle mówiąc, reguła Borna dotyczy prawdopodobieństwa znalezienia stowarzyszonej z funkcją falową cząstki w określonym *położeniu* w przestrzeni. Jednak zupełnie takie same zabiegi są stosowane do znajdowania prawdopodobieństwa uzyskania określonego wyniku pomiaru z kwadratu całkowitej funkcji falowej. Istotny jest tutaj fakt, że otrzymujemy prawdopodobieństwa z kwadratów odpowiednich funkcji falowych, zatem dla uproszczenia nadal będę nazywał to „regułą Borna".

CZĘŚĆ DRUGA

ROZGRYWKA

ROZDZIAŁ 5

Mechanika kwantowa jest kompletna

To zamknij się i licz

Widok ze Scylli: dziedzictwo Kopenhagi, relacyjna mechanika kwantowa i rola informacji

Z treści listów, którymi wymieniali się Einstein i Schrödinger, wynika, że już latem 1935 roku interpretacja kopenhaska zyskała rangę ortodoksji. Stała się podstawowym sposobem, w jaki fizycy mieli myśleć o mechanice kwantowej. Schrödinger ucieszył się, że EPR postanowili „publicznie rozliczyć dogmatyczną mechanikę kwantową”[99]. Einstein określał interpretację kopenhaską przymiotnikiem „talmudyczna”, widząc w niej filozofię „religii”, która ma być interpretowana wyłącznie przez jej wykwalifikowanych kapłanów, upierających się, że jest ona z gruntu prawdziwa, i nietolerujących konkurencji[100].

Filozof Karl Popper nazwał to schizmą.

> Jednym z wartych odnotowania aspektów tych sporów było powstanie rozszczepienia w fizyce. Pojawiło się coś, co można dość sprawiedliwie nazwać kwantową ortodoksją: to rodzaj odłamu, szkoły lub grupy, na której czele stanął Niels Bohr, bardzo aktywnie wspierany przez Heisenberga i Pauliego, a wśród mniej czynnych zwolenników znaleźli się Max Born i P[ascual] Jordan i może nawet Dirac. Innymi słowy, trafiły tu wszystkie wielkie nazwiska teorii atomowej, z wyjątkiem

dwóch wielkich ludzi, którzy dobitnie i konsekwentnie odcinali się od reszty: Alberta Einsteina i Erwina Schrödingera[101].

Wszystko to należy uznać za mocno niefortunne. Ponieważ interpretacja wykuwała się w ogniu niełatwego porozumienia między Bohrem i Heisenbergiem, którym za pośrednika służył Pauli, już zawsze miała być efektem kompromisu. Dla wielu fizyków, którzy – nawet dzisiaj – rutynowo stosują mechanikę kwantową bez specjalnego zamartwiania się o jej znaczenie, myśl, że być może nie ma w niej „na co patrzeć", nie jest szczególnie niepokojąca. Jednak dla tych (wprawdzie mniej licznych) naukowców, którzy wolą kopać nieco głębiej, zanim związą się z takim antyrealistycznym ujęciem, interpretacja kopenhaska jest niezadowalająca. Na każdą odpowiedź, której zdaje się udzielać, przypada jeszcze więcej nowych pytań bez odpowiedzi. Niejednoznaczność i zamęt, których jest źródłem, w połączeniu z niemal patologicznymi poziomami matematycznej abstrakcji, wprowadzonymi po raz pierwszy do teorii przez Diraca i von Neumanna, przełożyły się na to, że mechanika kwantowa jest praktycznie niezrozumiała, nawet dla wielu naukowców.

Nacisk Bohra na zasadę komplementarności oznaczał, że dyskusja na temat interpretacji szybko przerodziła się w spór dotyczący nieścisłości języka wykorzystywanego do opisu układów kwantowych i związku tychże układów z klasyczną aparaturą doświadczalną, jakiej używa się do przeprowadzania pomiarów. Nakreślił też linię podziału na świat klasyczny i kwantowy, która wydaje się całkowicie arbitralna – gdzież to miałby kończyć się świat kwantowy, a zaczynać świat klasyczny? Na poziomie atomów? Cząsteczek? A może kotów? Fizyk John Bell nazwał go „podejrzanym podziałem"[102].

Jestem pewny, że w tamtym czasie wydawało się to całkowicie rozsądne. Ani Bohr, ani Heisenberg nie mogli przewidzieć, jak bardzo czterdzieści lub pięćdziesiąt lat później zwiększy się potencjał utalentowanych eksperymentatorów i jak daleko rozwinięta zostanie aparatura pomiarowa, która staje się niezwykle wyrafinowana i zaawansowana technicznie. W kolejnych rozdziałach zobaczymy, że następne pokolenia fizyków były w stanie dokonywać pomiarów na

układach kwantowych na poziomie, o jakim twórcy filozofii duńskiego duszpasterstwa nie mogli nawet marzyć.

Komplementarność i ograniczenia aparatury klasycznej – główne filary interpretacji kopenhaskiej – po prostu nie mogły wytrzymać próby czasu.

Są to jednak tylko tematy poboczne. W zasadzie wydają się nieistotne w odniesieniu do kluczowego argumentu Bohra, który zawiera się w stwierdzeniu, że świat kwantowy jest *niedostępny*. Świat klasyczny jest w naszym rozumieniu zupełnie dostępny, jego podstawowe pojęcia bowiem, takie jak pęd i energia, nigdzie się nie ukrywają, są obecne „na powierzchni" równań. W przeciwieństwie do niego świat kwantowy znajduje się poza naszym zasięgiem. To główna prekoncepcja metafizyczna, czająca się w samym sercu interpretacji kopenhaskiej. Prekoncepcja ta mówi, że w fizyce kwantowej natykamy się na fundamentalne ograniczenie. Docieramy do granicy rozdzielającej metafizyczne rzeczy same w sobie od empirycznych rzeczy, jakimi się wydają.

Co się dzieje, gdy zapominamy o tych dodatkowych prekoncepcjach? Co się dzieje, gdy przyjmiemy, że nasza interpretacja *nie jest* ograniczana przez język klasycznego opisu lub przez naturę naszego przyrządu pomiarowego? Wystarczy, że oddzielimy nasze *doznanie* fizyki kwantowej od sposobu, w jaki zdecydujemy się je *odzwierciedlić* w jakimkolwiek języku, który uznamy za stosowny. Mówiąc inaczej, zamiast wypowiadać się o Trzecim Sądzie Logicznym w dość niejasny sposób, decydujemy się zrobić porządek raz a dobrze i całkowicie go odrzucamy. Mniej Bohra, więcej Heisenberga.

Właśnie tak zrobił współczesny teoretyk, Carlo Rovelli.

Rovelli całą karierę naukową fizyka teoretyka poświęcił na poszukiwanie kwantowej teorii grawitacji. W gruncie rzeczy chodzi o znalezienie sposobu na pogodzenie dwóch najbardziej fundamentalnych i najskuteczniejszych teorii fizyki – mechaniki kwantowej i ogólnej teorii względności Einsteina. Pierwsza z nich opisuje fizykę rzeczy bardzo małych. Przyjmując formę różnych kwantowych teorii pola, stanowi podstawę obowiązującego Modelu Standardowego fizyki cząstek. Model Standardowy święcił wiele

triumfów, najświeższym było odkrycie w 2012 roku bozonu Higgsa, dokonane w CERN w Genewie. Ta druga jest w zasadzie teorią czasoprzestrzeni. Opisuje, w jaki sposób masa-energia zakrzywia przestrzeń, co prowadzi do zjawiska grawitacji. Ogólna teoria względności stanowi fundament obowiązującego opisu Wszechświata, modelu standardowego Wielkiego Wybuchu. Najnowszym triumfem z wielu, jakie przyniosła ta teoria, było wykrycie w 2015 roku fal grawitacyjnych – zmarszczek czasoprzestrzeni wywoływanych tak gwałtownymi zjawiskami jak zlewanie się dwóch czarnych dziur.

Jak objaśnił to Lee Smolin w swojej książce *Trzy drogi do kwantowej grawitacji*, opublikowanej w 2000 roku, możemy mówić o trzech podejściach do realizacji tego zadania. Można zacząć od mechaniki kwantowej i szukać sposobu na ograniczenie jej w taki sposób, aby spełniała surowe wymogi ogólnej teorii względności. Można też zacząć od ogólnej teorii względności i szukać sposobu na jej „skwantowanie" – uzyskanie teorii, w której przestrzeń i czas mają naturę kwantową. Trzecia droga polega na rozpoczęciu wszystkiego od nowa przez poszukiwanie nowej teorii, która będzie obejmować formy wymagane przez mechanikę kwantową i ogólną teorię względności.

Rovelli i Smolin znajdują się w gronie głównych architektów teorii nazywanej *pętlową grawitacją kwantową*, powstałej na drodze, w której punktem wyjścia jest ogólna teoria względności[103].

Nie trzeba dodawać, że jeśli mechanika kwantowa ma być fundamentem, na którym zostanie zbudowana misterna teoria grawitacji, to całkowity brak jasności w kwestii interpretacji i znaczenia jest okolicznością skrajnie niesprzyjającą. Co ciekawe, obaj naukowcy, Rovelli i Smolin, szukali jasności na własny rachunek, ale interpretacja mechaniki kwantowej jest jednym z dwóch problemów współczesnej fizyki, co do których nie mogą dojść do porozumienia (drugim jest realność czasu).

Owszem, Rovelli zawsze uważał mechanikę kwantową za wyjątkowo rewolucyjną teorię, jednak nigdy nie postrzegał jej jako niespójnej lub niekompletnej w jakimkolwiek sensie. W pierwszych latach ich współpracy do Rovellego i Smolina dołączył fizyk

matematyczny Louis Crane. W toku pogłębionych dyskusji rzucali pomysłami na temat relacji zachodzących między elementami rzeczywistości a obserwatorem, filozofii Leibniza i mechaniki kwantowej. „Według tego, co pamiętam – wyjaśnia Smolin – rozważaliśmy kolejne podstawowe idee i tworzyliśmy teorie wyrażające ideę *relacyjności* mechaniki kwantowej”[104].

Rozwijając swoje teorie względności, Einstein szukał sposobu na całkowite wyrzucenie z fizyki metafizycznych pojęć przestrzeni absolutnej i czasu absolutnego. Jednym ze skutków jest to, że z powrotem w ogólnym obrazie mocno zakotwicza się obserwatora, dokonującego pomiarów za pomocą linijki i zegara i przeprowadzającego obserwacje *wewnątrz* fizycznej rzeczywistości, którą bada. Nie ma mowy o żadnej wyjątkowej perspektywie, czymś w rodzaju „boskiego spojrzenia” na Wszechświat. Warto zauważyć, że mówiąc „obserwator”, niekoniecznie mamy na myśli człowieka. Wystarczy, że będzie istniało coś (cokolwiek), z czym układ fizyczny może ustanowić jakąkolwiek relację. Zamiast mierzyć się z metafizycznymi rzeczami samymi w sobie, mamy do czynienia z rzeczami będącymi w relacji z innymi rzeczami. Jeżeli relacja dotyczy ludzkiego obserwatora, wówczas mówimy o rzeczach, jakimi się wydają. Jeżeli zaś dotyczy przyrządu pomiarowego, takiego jak linijka lub zegar, to mówimy o rzeczach tak, jak zostały zmierzone.

Również w mechanice kwantowej obserwator odgrywa fundamentalną rolę. Tak jak Einstein odrzucił pogląd, że może istnieć przestrzeń absolutna i czas absolutny, Rovelli zdecydował się odrzucić pogląd, iż układ kwantowy istnieje w absolutnym, niezależnym od obserwatora stanie. Innymi słowy, w relacyjnej mechanice kwantowej nie jesteśmy w stanie odkryć zupełnie niczego na temat fizycznych stanów kwantowych samych w sobie. Napisał: „Stawiam tezę [...] że odrzucając ten pogląd (na rzecz słabszego określenia stanu – i wartości wielkości fizycznych – w relacji do czegoś), nadajemy mechanice kwantowej dużo więcej sensu”[105].

Przyjmując taki punkt widzenia, Rovelli nie odrzuca istnienia obiektywnej rzeczywistości lub rzeczywistości „niewidzialnych” bytów, takich jak elektrony. W szerokim znaczeniu akceptuje Pierwszy i Drugi Sąd Logiczny. Są rzeczy same w sobie, istniejące

obiektywnie i niezależnie – elektrony istnieją i będą istnieć nawet wtedy, gdy nikt nie patrzy na nie ani o nich nie myśli. Jednak, jak twierdził Kant, nic na ich temat nie możemy odkryć. Mówienie o ich stanach kwantowych i własnościach ma sens tylko wtedy, gdy są ustalone w relacji z innym układem. Podważa to sensowność Trzeciego Sądu Logicznego: mechanika kwantowa dotyczy *relacji pomiędzy rzeczami*, a nie rzeczywistych własności realnych ciał fizycznych, niezależnych od relacji.

Jeśli więc używane przez nas w mechanice kwantowej równania matematyczne nie odnoszą się do istniejących niezależnie rzeczywistych stanów fizycznych układów kwantowych, to do czego się odnoszą? Rovelli odpowiada, że odnoszą się one do *informacji* o układzie kwantowym, pochodzącej z naszego doświadczenia tego układu.

Zatem relacyjna interpretacja Rovellego w żaden sposób nie wymaga, abyśmy przypisywali jakiekolwiek szczególne znaczenie procesowi dokonywania pomiaru. Jeśli o niego chodzi, to pomiar jest tylko jednym z wielu różnych sposobów nawiązywania relacji kluczowych dla mechaniki kwantowej. Oczywiście, ma on podstawowe znaczenie, ponieważ właśnie tak zdobywamy wiedzę na temat układów kwantowych. Wobec tego spróbujmy krok po kroku omówić tę interpretację na przykładzie typowego pomiaru jakiegoś procesu.

Załóżmy jeszcze raz, że na bazie naszych wcześniejszych doświadczeń i rozumienia fizyki przygotowujemy układ kwantowy, który może znajdować się w jednym z dwóch możliwych stanów – ↑ lub ↓. Załóżmy też, że zaangażowany jest tylko jeden rodzaj cząstek, który oznaczymy A. Jak teraz wiemy, poprawny opis tego układu realizowany jest za pomocą całkowitej funkcji falowej, wyrażonej jako superpozycja składowych funkcji falowej dla A w stanie ↑ oraz funkcji falowej dla A w stanie ↓:

Zanim pójdziemy dalej, sprawdźmy tylko, skąd bierze się to wyrażenie. Z wcześniejszych eksperymentów wiemy, że jeśli przygotujemy układ w taki sposób, nabyte doświadczenie i nasze rozumienie fizyki nakazuje nam przewidywać, iż układ będzie znajdował się w jednym albo drugim stanie. Ewentualnie, alternatywnie, jeżeli ustanowimy pewien rodzaj *relacji* między układem kwantowym a urządzeniem, którego użyliśmy do przygotowania układu, przewidujemy, że układ może być w jednym albo drugim stanie. Wiemy również, że aby formułować poprawne przewidywania na temat zachowania układu w przyszłości, musimy przedstawić te dwa stany w postaci superpozycji, którą nazywamy całkowitą funkcją falową. Wykorzystujemy informacje zdobyte wcześniej w ramach innych badań fizycznych, aby napisać wzór całkowitej funkcji falowej układu kwantowego jako superpozycję stanów ↑ i ↓.

Ważne, aby mieć jasność co do stosowanego przeze mnie nazewnictwa. Używam słów takich jak „my" i „informacja", które mogłyby sugerować, że znowu wszystko kręci się wokół ludzkich obserwatorów i informacji na temat wyników pomiarów, na przykład zapisanych w laboratoryjnym notesie. Podsuwanie takiej sugestii nie jest zamierzone. Rovelli posługuje się słowem „informacja" w fizycznym znaczeniu, mając na myśli formę, która może manifestować się przez nieożywione ciała fizyczne: „Długopis na moim biurku zawiera informację, ponieważ skierowany jest w tę lub tamtą stronę. Aby posłużyć się tym pojęciem informacji, niepotrzebny jest człowiek, kot ani komputer"[106].

Idźmy dalej. Jeżeli wkład od każdej funkcji falowej w superpozycji jest równy, to możemy się spodziewać, że przeprowadzony następnie pomiar da wynik *albo* ↑, *albo* ↓ z równym prawdopodobieństwem (50:50). Uzyskane wyniki są losowe: nie mamy żadnej możliwości, aby zawczasu przewidzieć, co uzyskamy.

Co jednak w przypadku, gdy zamiast mierzyć własność ↑ lub ↓ układu, zdecydujemy się dokonać pomiaru innej własności? Nazwijmy ją własnością + lub –. Wiemy, znowu na podstawie wcześniejszych doświadczeń i naszego rozumienia fizyki, że układ

kwantowy, składający się ze zbioru cząstek A przygotowanych wyłącznie w stanie ↑, będzie w kolejnym pomiarze wykazywał z równym prawdopodobieństwem obie wartości własności + i –. Podobnie układ kwantowy przygotowany tak, że cząstki A znajdują się wyłącznie w stanie ↓, będzie wykazywał wartość + i – z równym prawdopodobieństwem.

Co mamy z tym począć?

Pamiętamy z rozdziału 1, że nie ma czegoś takiego jak właściwa funkcja falowa. Mamy pełną swobodę w dobraniu takiej formy całkowitej funkcji falowej, która będzie najodpowiedniejsza do konkretnego problemu, jaki próbujemy rozwiązać. To, czego nam trzeba, to inny rodzaj superpozycji. Zamiast ↑ i ↓ potrzebujemy superpozycji + i –.

Można to zrobić stosunkowo łatwo. Nie chcę zanudzać szczegółami. Wystarczy powiedzieć, że wykorzystujemy nabytą w toku poprzednich doświadczeń wiedzę na temat zachowania układów kwantowych przygotowanych wyłącznie w stanach ↑ i ↓, aby wysnuć wniosek, iż

Przyznaję, że wygląda to tak, jakbyśmy po prostu zastąpili funkcje falowe dla ↑ i ↓ funkcjami falowymi dla + i –, jednak zaufajcie mi, proszę, nieważne, jak to wygląda, istota rzeczy wcale nie na tym polega. Istnieją pewne mocno rygorystyczne reguły matematyczne, którymi należy się kierować w razie takiej zamiany. Pomocna może być wiedza, iż stany ↑ i ↓ oraz + i – często nazywa się *stanami podstawowymi*, a to, co zrobiliśmy, określa się mianem *zmiany bazy* odwzorowania całkowitej funkcji falowej. Nie ma czegoś takiego jak „właściwa” albo „preferowana” baza. Wykorzystujemy wiedzę zdobytą w toku badań fizycznych do zmiany całkowitej funkcji falowej na opis względem dowolnej bazy, która jest istotna

w kontekście rozwiązywanego problemu. W tym wypadku dokonujemy zmiany na superpozycję stanów pomiarowych + i –.

Jak przedtem, wkład wnoszony przez funkcje falowe dla + i dla – jest równy, możemy więc się spodziewać, że w przeprowadzanym pomiarze z jednakowym prawdopodobieństwem uzyskamy albo +, albo – (szanse są 50:50). I znowu nie ma sposobu, abyśmy z wyprzedzeniem wiedzieli, jaki wynik otrzymamy.

Wierzcie mi na słowo, wszystko to jest całkowicie poprawne. Wiemy (znowu bazując na zdobytym doświadczeniu), że w serii pomiarów przeprowadzanych na identycznie przygotowanych układach najprawdopodobniej uzyskamy losową sekwencję wyników, na przykład +, –, +, +, +, –, –, + … Choć wszystkie pomiary laboratoryjne obciążone są błędami, to jednak wiemy też, że po przeprowadzeniu statystycznie znaczącej liczby pomiarów w połowie uzyskamy wynik +, a drugie 50 procent pomiarów da wynik –.

Co się tutaj stało?

Rovelli twierdzi, że po prostu używamy funkcji falowej jako wygodnego sposobu *kodowania* posiadanych informacji o układzie kwantowym. „[Funkcja falowa] którą łączymy z układem […] jest więc, przede wszystkim, tylko kodowaniem wyniku tych poprzednich interakcji [z układem]”[107]. Stanowi więc sposób na wykorzystanie informacji uzyskanych w poprzednich pracach badawczych do formułowania przewidywań zachowania układu w pomiarach, które dopiero zamierzamy przeprowadzić. Zakodowana informacja pozwala nam formułować przewidywania dotyczące relacji, jakie jeszcze nie zaistniały.

Mówiąc inaczej, funkcja falowa nie jest rzeczywista w sensie Trzeciego Sądu Logicznego. Nie jest pojęciem podstawowym. Nie odzwierciedla rzeczywistego stanu układu kwantowego. „[W relacyjnej mechanice kwantowej] stan kwantowy nie jest interpretowany realistycznie, ale położenie elektronu, gdy ten uderza w ekran, jest […] elementem rzeczywistości (choć w relacji z ekranem)”[108]. Funkcja falowa jest tylko wygodnym narzędziem, które pozwala nam łączyć przeszłość i przyszłość.

Odrzucenie w mechanice kwantowej Trzeciego Sądu Logicznego uwalnia nas od wszelkich rzekomych sprzeczności. Kiedy tworzymy

całkowitą funkcję falową jako superpozycję dwóch możliwości, po prostu potwierdzamy, że na bazie doświadczenia wiemy, czego oczekiwać – pomiar układu kwantowego przyniesie wyniki takie jak ↑ lub ↓ albo + lub –, zależnie od rodzaju pomiaru, jaki mamy zamiar przeprowadzić. Superpozycja jest jedną z informacji, nie jest realna, nie istnieje niezależnie od stanów fizycznych.

Jeśli funkcja falowa jest tylko zakodowaną informacją, nie jest wymagana zgodność z jakimikolwiek prawami fizycznymi lub procesami mechanicznymi. Informacja nie jest „lokalna" lub „nielokalna". Sama w sobie nie jest ograniczona ani szczególną, ani ogólną teorią względności Einsteina (aczkolwiek każda próba *przesłania* tej informacji będzie już takim ograniczeniom podlegać). Informacja może ulec zmianie natychmiastowo. Funkcja falowa, która składa się tylko z informacji, nie musi wcale przechodzić bliżej nieokreślonego, nieciągłego kolapsu fizycznego. Rovelli wyjaśnia to tak: „Zmiana ta nie stwarza problemu, z tego samego powodu, który pozwala na nieciągłą zmianę informacji, jakie mam na temat Chin, za każdym razem gdy przeczytam w gazecie artykuł na temat tego kraju"[109].

Nie jest to bardziej tajemnicze niż sytuacja, w której sędzia rzuca monetą na początku meczu piłkarskiego lub tenisowego. Jeśli odczuwalibyśmy taką potrzebę, moglibyśmy zakodować wyniki tej procedury jako superpozycję orłów i reszek. Moneta obraca się w powietrzu i ląduje na ziemi, dostajemy wynik: „orzeł". Jesteśmy przekonani, że przez cały czas utrzymuje się taki sam rozkład szans wypadnięcia każdej strony monety, ale ponieważ nie znamy precyzyjnej mechaniki rzutu i własności ruchu monety w powietrzu, odwołujemy się do prawdopodobieństwa. Nie mamy skłonności do stwierdzeń, że w momencie oddziaływania z powierzchnią dwa możliwe wyniki rzutu „przechodzą kolaps" do jednego, choć, zasadniczo, moglibyśmy to robić.

W relacyjnej interpretacji mechaniki kwantowej Rovellego moglibyśmy dość dobrze rozumieć mechanikę, w zakresie ograniczeń narzucanych przez zasadę nieoznaczoności, ale zupełnie tracimy z oczu możliwości uzyskiwanych wyników, ponieważ dopóty nic nie

możemy powiedzieć o niezależnie istniejących stanach kwantowych, dopóki nie weszły one w relacje z innym układem. W odniesieniu do kwantowego rzutu monetą byłoby to tak, jakbyśmy mogli przewidzieć mechanikę ruchu monety w powietrzu oraz liczbę wykonanych obrotów, ale teraz strony monety nie istniałyby już niezależnie, tylko w relacji ich oddziaływania z podłożem. Odwołujemy się do prawdopodobieństw, ponieważ nic nie wiemy o stronach monety samych w sobie. Znamy jedynie strony monety na ziemi.

Pójdźmy odrobinę dalej. Jak każde materialne ciało fizyczne we Wszechświecie, urządzenie używane przez nas do pomiaru stanu + lub – układu kwantowego również złożone jest z „niewidzialnych" obiektów kwantowych, takich jak atomy zawierające kwarki i elektrony. Załóżmy, że podłączymy to urządzenie do miernika z podziałką i wskazówką. Jeśli wynik pomiaru wskazuje stan + układu, wskazówka wychyla się w lewo. Jeżeli zmierzony stan układu to –, wskazówka wychyla się w prawo.

Jak wygląda poprawny opis kwantowomechaniczny tej sytuacji?

Cóż, zależy to od tego, czy patrzymy na wskazówkę. Dopóki nie spojrzeliśmy, co pokazuje wskazówka, dopóty właściwe odwzorowanie całkowitej funkcji falowej wygląda mniej więcej tak:

Widzieliśmy już coś takiego. Pierwotny układ kwantowy i urządzenie pomiarowe wchodzą w *stan splątania* za pośrednictwem miernika. Dopóki nie zobaczymy, w którą stronę wychyliła się wskazówka, dopóty poprawne podsumowanie dostępnych informacji przyjmuje postać jeszcze jednej superpozycji.

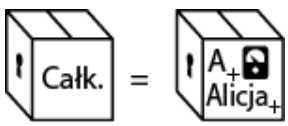
Moglibyśmy takie superpozycje mnożyć bez końca, jak się zdaje, i chyba właśnie o to chodziło Schrödingerowi, gdy obmyślał swój słynny paradoks kota. Jeżeli dostroimy miernik w taki sposób, że wychylenie wskazówki w prawo zabija zamkniętego w pudełku zwierzaka, dodajemy kolejny element splątania: teraz układ kwantowy, pierwotne urządzenie pomiarowe, miernik i kot dają

Chcąc odkryć stan kota, musimy wprowadzić jeszcze jedno urządzenie (mnie lub ciebie), zdolne unieść wieko pudełka i zobaczyć wnętrze.

Instynktownie stwierdzamy, że z całą pewnością kot Schrödingera musi być już martwy albo jest żywy, *zanim* uniesiemy wieko pudełka. Rovelli jednak wzrusza ramionami. Oczywiście, możemy *snuć teoretyczne rozważania* na temat fizycznego stanu kota sprzed „dokonania pomiaru", ale nie uciekniemy przed prostą prawdą: *nie wiemy*, jaki jest jego stan, dopóki nie ustanowimy relacji z kotem, podnosząc wieko i spoglądając do środka.

Nasz błąd polega na tym, że myślimy, iż superpozycja odzwierciedla fizyczny stan kota – biedne kocisko istnieje w czymś w rodzaju czyśćca – a nie stanowi po prostu odzwierciedlenia całkowitej wiedzy o danej sytuacji. Podniesienie wieka nie prowadzi do kolapsu funkcji falowej w jakimś fizycznym sensie, kojarzonym z przeciągnięciem kota z czyśćca w stan śmierci lub stan życia. Nie ma fizycznego kolapsu. Jedyną rzeczą, która się zmienia, gdy unosimy wieko, jest stan naszej wiedzy na temat kota. Według Rovellego nie nastręcza to żadnego problemu.

Zabawmy się trochę. Alicja i Bob są fizykami doświadczalnymi, badającymi w laboratorium fundamentalne aspekty mechaniki kwantowej. Bob trochę się spóźnia, Alicja dokonuje więc pomiaru pod jego nieobecność. Patrzy na wskazówkę i widzi, że wychyla się ona w lewo, 🔓, co odpowiada wynikowi pomiaru A_+. Zapisuje wynik w notesie jako „+" (gdyby zobaczyła wynik 🔒, zapisałaby „–"). Oznaczmy te wyniki symbolicznie jako Alicja_+ i Alicja_-. Jeśli chodzi o Alicję, według niej stan układu kwantowego wynosi jednoznacznie +. Dochodzi ona do wniosku, że teraz układ kwantowy znajduje się w stanie opisywanym funkcją falową:



Tymczasem Boba dorwał w korytarzu kierownik projektu badawczego; chce on wiedzieć, jaki jest stan układu kwantowego, na którym Alicja właśnie przeprowadziła pomiar. Może wydawać się to trochę niesprawiedliwe, Bob bowiem nie może tego wiedzieć, ale zna się na mechanice kwantowej, czerpie więc ze swojej wiedzy na temat badanego układu (który teraz zawiera też Alicję) i wyjaśnia, że układ znajduje się w stanie opisywanym przez funkcję falową:

Według Boba Alicja i zapisany przez nią w dzienniku laboratoryjnym wynik są teraz splątani w całkowitej funkcji falowej. Informuje kierownika projektu, że z prawdopodobieństwem wynoszącym 50 procent Alicja zaobserwuje wynik + (wskazówka skierowana w lewo, „+” w jej dzienniku laboratoryjnym) i z prawdopodobieństwem równym 50 procent zaobserwuje – (wskazówka skierowana w prawo, „–” w jej dzienniku laboratoryjnym). Wszystko to może wydawać się całkowicie rozsądne – Bob nie może znać wyniku pomiaru, ponieważ nie było go w laboratorium, gdy pomiar był przeprowadzany. Jeśli jednak teraz otworzy drzwi laboratorium i zapyta Alicję, jaki wynik uzyskała, to dla niego czynność ta stanowi „pomiar” obejmujący całkowitą funkcję falową, w której zachodzi splątanie Alicji.

Zanim otworzy drzwi, Alicja i Bob *przypisują układowi kwantowemu różne stany* (*różne funkcje falowe*), co skłania Rovellego do sformułowania wniosku, że „w mechanice kwantowej różni obserwatorzy mogą w różny sposób opisywać tę samą sekwencję zdarzeń”[110].

Wydaje się, że nie miałoby to żadnego sensu, gdybyśmy przyjęli, iż funkcje falowe są realnie istniejącymi obiektami fizycznymi.

Bez trudu można rozszerzyć ten tok rozumowania na sytuację przedstawioną przez EPR, obejmującą dwie splątane cząstki, A i B, oraz ich stany kwantowe $\uparrow$ i $\downarrow$. Z rozdziału 4 wiemy, że całkowita funkcja falowa takiego układu opisywana jest przez:

Załóżmy, że obie cząstki oddalają się od siebie, A porusza się w lewo, B porusza się w prawo. Czekamy, aż dzieląca cząstki odległość będzie na tyle duża, że nie będzie szans, aby nadal łączył je związek przyczynowo-skutkowy, co znaczy, iż w dostępnym czasie nie mogą wymieniać się oddziaływaniami fizycznymi ani przesyłać między sobą informacji wywołującej fizyczne skutki[111]. Dokonujemy pomiaru w dwóch osobnych laboratoriach[112]. W laboratorium po lewej stronie Alicja rejestruje, iż cząstka A znajduje się w stanie ↑.

Zatem, ponieważ wie, jak przygotowany był pierwotny układ kwantowy, Alicja może pozwolić sobie na *spekulacje*, iż cząstka B musi znajdować się w stanie ↓, ale w chwili gdy zarejestruje cząstkę A osobiście, nie może *znać* stanu cząstki B, ponieważ nie ustanowiła z nią żadnej relacji. Podobnie, w laboratorium po prawej stronie Bob rejestruje cząstkę B i stwierdza, że znajduje się ona w stanie ↓, ale może tylko spekulować, iż w takim razie cząstka A musi znajdować się w stanie ↑.

Jeśli sytuacja ta ma ulec zmianie, konieczne jest wystąpienie *dalszej interakcji* między Alicją i Bobem, polegającej na wymianie przez nich informacji na temat uzyskanych wyników. Możliwe jest też, że oboje przekażą swoje wyniki jakiemuś trzeciemu obserwatorowi – nazwijmy go Charles – który na podstawie tych informacji wysnuje wniosek, że stany cząstki rzeczywiście są skorelowane, A znajduje się w stanie ↑, natomiast B w stanie ↓. Wszyscy troje formułują stwierdzenie, iż w rezultacie pomiaru przeprowadzonego na A lub B doszło do kolapsu całkowitej funkcji falowej, co daje wynik $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$. Potem zachodzą w głowę, co zrobić z mechaniką kwantową, gdy prowadzi ona do nielokalności całkowitej funkcji falowej i upiornego oddziaływania na odległość.

Rovelli twierdzi jednak, iż jest to błędny sposób myślenia o tym, co tu się stało. Wszystko, co naprawdę zmieniło się w wyniku tej sekwencji zdarzeń, to natura informacji dostępnej Alicji, Bobowi

i Charlesowi. Kiedy Alicja wykonuje swój pomiar, ustanawia relację z cząstką A. Podobnie Bob, kiedy wykonuje swój pomiar, ustanawia relację z cząstką B, która to relacja jest całkowicie niezależna od relacji Alicji z cząstką A.

We wszystkim tym nie ma nic nielokalnego, tajemniczego ani upiornego. Moglibyśmy jednak spytać, jak ustanawiana jest korelacja między cząstkami A i B. To proste. Alicja i Bob wykorzystali swoją wiedzę o dwucząstkowych układach kwantowych, nabytą w toku poprzednich prac badawczych, i zakodowali tę informację w całkowitej funkcji falowej. Pamiętajmy, że istnieje zasada zachowania, z której wynika, iż jedynymi możliwymi wynikami są $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ oraz $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$. Zasada ta w szczególności *wyklucza* możliwości $A_{\uparrow}B_{\uparrow}$ oraz $A_{\downarrow}B_{\downarrow}$, co tłumaczy, dlaczego wyniki te nie zostały włączone do wyrażenia opisującego całkowitą funkcję falową. Mówiąc inaczej, informacja o korelacji została „wprowadzona na wstępie" do całkowitej funkcji falowej. To, że korelację rzeczywiście zaobserwowano w dwóch laboratoriach – o czym dowiadujemy się za sprawą późniejszej łączności, w której sygnał przesyłany jest w bardzo nieupiorny sposób z prędkością nieprzekraczającą prędkości światła – po prostu odzwierciedla fakt, iż *informacja została zakodowana poprawnie*. Wszystko, co nasi badacze zrobili, to posłużyli się wiedzą na temat zdarzeń z przeszłości do sformułowania przewidywań na temat wyniku serii zdarzeń późniejszych.

Interpretacja Rovellego wymaga, by układy kwantowe wchodziły w relacje, zanim zostanie uzyskana znacząca informacja na ich temat. Są jednak alternatywne propozycje, które skupiają się wyłącznie na naturze informacji dotyczącej układów kwantowych. Znane są ogólnie jako interpretacje wywodzące się z teorii informacji.

Wywodząc wskazówki ponownie z pozytywizmu Heisenberga, fizyk Anton Zeilinger zasugerował, że mechanika kwantowa jest zasadniczo teorią dotyczącą informacji, w której to, co nazywamy własnościami fizycznymi, jest tak naprawdę *sądami logicznymi* odnoszącymi się do tej informacji, formułowanymi na podstawie

zdobytych wcześniej doświadczeń. Prawdziwość lub fałszywość tych sądów logicznych można określić w późniejszych obserwacjach. „W sumie obiekt jest więc użyteczną konstrukcją myślową, łączącą obserwacje" – pisze Zeilinger[113].

W mechanice kwantowej nie wszystkie sądy logiczne mogą być jednocześnie prawdziwe; zdania: „ten układ przejawia informacje charakterystyczne dla liniowej trajektorii cząstki" i „ten układ przejawia informacje charakterystyczne dla interferencji falowej" nie mogą być jednocześnie prawdziwe dla tego samego układu. Oznacza to, że *zbiór* informacji dotyczących danego układu jest siłą rzeczy ograniczony lub zawężony.

Zeilinger definiuje elementarny układ kwantowy jako ten, który przenosi informację dostateczną do określenia prawdziwości dokładnie jednego sądu logicznego. Tymczasem układy kwantowe mogą być charakteryzowane przez kilka własności fizycznych, przyjmujące biegunowo przeciwne wartości, takie jak dodatni lub ujemny (+ lub –), w górę lub w dół (↑ lub ↓), w lewo lub prawo. Możemy myśleć o nich w kategoriach „wyłączony" lub „włączony" albo liczb układu binarnego, 0 lub 1, znanych w informatyce jako „bity". Wobec tego elementarny układ kwantowy przenosi jeden bit informacji. To, co otrzymujemy, zależy od rodzaju pytania, jakie eksperymentator stawia sobie wobec danego układu.

Rozważmy układ kwantowy przygotowany wyłącznie w stanie ↑. Jeżeli wygłosimy sąd logiczny: „układ ten przejawia informację charakterystyczną dla stanu ↑", to uzyskamy wynik „prawda". Co jednak w sytuacji gdy wygłosimy sąd logiczny: „układ ten przejawia informację charakterystyczną dla stanu +"? Jak wcześniej, jesteśmy zobligowani przepisać całkowitą funkcję falową tego układu do postaci superpozycji stanów + i –. Tylko że teraz dostępna informacja na temat układu jest niewystarczająca, aby uzyskać proste stwierdzenie „prawda" lub „fałsz". Zamiast tego wynik jest całkowicie losowy. W niektórych przypadkach będzie to „prawda", w innych „fałsz", z równym prawdopodobieństwem (50:50).

Oczywiście, możemy zwiększyć skalę do układów będących wielokrotnością układu podstawowego, zdolnych przenosić

informację dostateczną do określenia prawdy w odniesieniu do wielu sądów logicznych, obejmującą wiele bitów. Stan splątany jest dwubitowym układem składającym się z dwóch cząstek, w którym występująca między cząstkami korelacja wymaga więcej niż jednego bitu. Wychodząc od dość prostych zasad wywodzących się z teorii informacji, można uzyskać pełną rekonstrukcję mechaniki kwantowej.

W sformułowaniu Zeilingera informacja kwantowa jest przejawem ukrytych własności kwantowych, podobnie jak temperatura jest przejawem ukrytego ruchu atomów i cząsteczek. Teoretyk Jeffrey Bub twierdzi jednak, iż informacja kwantowa jest nową wielkością „pierwotną", której nie można sprowadzić do pól lub cząstek[114]. W interpretacji Buba informacja nie jest zależna od istnienia obserwatorów, lecz raczej stanowi fundamentalny składnik rzeczywistości.

Jak w interpretacji relacyjnej, przyjęcie prekoncepcji, zgodnie z którą funkcja falowa odzwierciedla informację na temat układu fizycznego, a nie sam układ, uwalnia nas od wszystkich nieprzyjemnych konsekwencji, jakie zdaje się nieść mechanika kwantowa. Jednocześnie jednak oddzielenie fizyki układu kwantowego od przygotowanego przez nas odwzorowania tegoż układu jest całkowicie sprzeczne z intuicją. Musimy walczyć z pokusą wtłaczania w to odwzorowanie więcej, niż mamy gwarancję uzyskać. Rovelli podziela tę opinię. Metafizyczne prekoncepcje wypływające z Trzeciego Sądu Logicznego są w znaczącym stopniu drugą naturą, pogłębioną przez długi okres znajomości mechaniki klasycznej. Domniemanie realności podstawowych pojęć naszych odwzorowań „to filozoficzne założenie, za którego istnienie nauka była niezmiernie wdzięczna"[115]. Było to wszak zawsze tylko założenie.

I zobaczcie, co dostajemy, gdy jesteśmy gotowi odrzucić to założenie. Znikają wszystkie nasze problemy!

Natomiast interpretacje relacyjne i wywodzące się z teorii informacji żądają od nas poważnego kompromisu, a cena do zapłacenia jest naprawdę wysoka. Aby zyskać te korzyści, musimy rozluźnić swoje rozumienie samego pojęcia rzeczywistości. Rovelli wyjaśnia to następująco: „porzucenie ścisłego realizmu Einsteina

pozwala uwolnić się od [...] intelektualnej akrobatyki”[116]. Musimy zadowolić się tym, co jesteśmy w stanie odkryć na temat układów kwantowych, i wykorzystać formalizm matematyczny do interpretowania tych informacji w sposób umożliwiający formułowanie przewidywań odnośnie do przyszłych pomiarów. Wiemy, że działa to wprost fantastycznie. Nie spodziewajmy się jednak, że interpretacja ta powie nam, co naprawdę się dzieje.

Co *fizycznie* dzieje się z elektronem w trakcie podróży zapoczątkowanej w emiterze elektronów, kontynuowanej przez przesłonę z dwiema szczelinami i kończącej się na ekranie fosforescencyjnym, gdzie jest on wykrywany w postaci pojedynczej jasnej plamki? Co dzieje się *fizycznie*, gdy uzyskujemy ściśle określony wynik badania układu kwantowego, dla którego istnieją dwa możliwe wyniki pomiaru? Co dzieje się *fizycznie* z kotem Schrödingera przed uchyleniem przez nas wieka i zerknięciem do środka? Co dzieje się *fizycznie* z obiema cząstkami A i B, gdy Alicja dokonuje obserwacji, iż cząstka A znajduje się w stanie ↑? Czy w tym eksperymencie wywierany jest jakikolwiek *fizyczny* wpływ na cząstkę B?

Zgodnie z interpretacjami relacyjnymi i wywodzącymi się z teorii informacji po prostu nie ma odpowiedzi na te pytania. Nie dzieje się tak dlatego, że brak nam intelektu, aby je znaleźć, lecz dlatego, że pytania te są pozbawione sensu. Stan kwantowy elektronu dopóty nie ma znaczenia, dopóki nie ustanowi on relacji z ekranem fosforescencyjnym. Zanim to się stanie, nie możemy *powiedzieć* o nim nic sensownego. Nie możemy *powiedzieć* nic sensownego o układzie kwantowym, dla którego istnieją dwa możliwe wyniki pomiaru, zanim ustanowi on relację z urządzeniem pomiarowym i będziemy mogli zobaczyć wynik. Nie możemy *powiedzieć* nic sensownego o stanie kota Schrödingera dopóty, dopóki nie uniesiemy wieka i nie ustanowimy z nim relacji. Niezależnie od wyniku pomiaru uzyskiwanego przez Alicję dla cząstki A nie możemy *powiedzieć* nic sensownego na temat stanu cząstki B dopóty, dopóki Bob nie ustanowi z nią relacji. Nie możemy *powiedzieć* nic sensownego na temat stanu dwucząstkowego układu

AB, zanim Alicja nie ustanowi relacji z cząstką A i Bob nie ustanowi relacji z cząstką B, a następnie Alicja i Bob nie ustanowią relacji pomiędzy sobą.

Nie ma tu nic, co można zobaczyć.

John Wheeler, zawsze gotów wygłosić celny komentarz albo błyskotliwy epitet, nazwał to „wielkim zadymionym smokiem” (zob. rysunek 10). Wydaje nam się, że na początku jakiejś przemiany fizycznej całkiem dobrze rozumiemy układ kwantowy – widzimy ogon smoka – natomiast na końcu znamy wynik – widzimy głowę smoka. Jednak między początkiem a końcem odnosimy wrażenie, że nie potrafimy o fizyce powiedzieć nic sensownego. Ciało smoka jest niedostępne, jakby spowijała je jakaś nieprzenikniona kwantowa mgła.

Rysunek 10. „Wielki zadymiony smok” Wheelera

Pamiętacie ten cytat z wypowiedzi Bohra? „Błędem jest sądzić, że fizycy mają za zadanie odkryć, jaka jest natura. Fizyków interesuje, co możemy powiedzieć o naturze”[117].

Słowa te całkiem dobrze współbrzmią z cytatem z Alfreda J. Ayera, brytyjskiego rzecznika odłamu pozytywizmu wiązanego z Kołem Wiedeńskim:

> Oryginalność przedstawicieli pozytywizmu logicznego polega na tym, iż wykluczają oni metafizykę, odwołując się nie do

> natury tego, co można *poznać*, ale do natury tego, co można *powiedzieć*[118].

Jeśli jeszcze przypomnimy sobie słynny cytat z Ludwiga Wittgensteina: „O czym nie można mówić, o tym trzeba milczeć”[119], nieuchronnie dochodzimy do raczej haniebnego wniosku. Skoro nie możemy powiedzieć o fizyce nic sensownego, ale mamy doskonale zadowalające odwzorowanie, które działa fantastycznie dobrze, to może powinniśmy po prostu *zamknąć się i liczyć*.

Choć to ostatnie wyrażenie często przypisywane jest Richardowi Feynmanowi, wydaje się, że zostało ukute przez N. Davida Mermina. Kiedy w latach pięćdziesiątych XX wieku na studiach doktoranckich poznawał mechanikę kwantową, profesorowie niezbyt elegancko zbywali jego pytania na temat znaczenia i interpretacji:

> „Nigdy nie zrobisz doktoratu, jeśli pozwolisz, aby rozpraszały cię takie błahostki – stale mi doradzali – wracaj więc do poważnej pracy i zdobądź jakieś wyniki”. „Zamknij się – innymi słowy – i licz”. Tak też zrobiłem i zapewne wyszło mi to na dobre. W starych dobrych czasach wiedzieli na Harvardzie, jak rozdawać troskliwe kuksańce[120].

Z mojego punktu widzenia w kontekście Trzeciego Sądu Logicznego interpretacje relacyjne i wywodzące się z teorii informacji są stanowczo antyrealistyczne. Świadomi jednak nieufności Hackinga wobec osądów opartych wyłącznie na odwzorowaniu, zadajmy pytanie inaczej. Czy w duchu Czwartego Sądu Logicznego interpretacje relacyjne i wywodzące się z teorii informacji są po prostu biernymi, empirycznie adekwatnymi (a więc antyrealistycznymi) interpretacjami, czy też są w jakimś stopniu bardziej aktywne?

Według mnie, jeżeli funkcja falowa jest zakodowaną informacją, bazującą na doświadczeniach zebranych w poprzednich badaniach zjawisk kwantowych, wówczas interpretacje te z całą pewnością są bierne. Jak widzieliśmy, nie mogą być podstawą do wypowiedzenia jakiejkolwiek sensownej uwagi na temat fizyki, która stoi za tą informacją, czyli nie dostarczają żadnych pogłębionych spostrzeżeń

lub rozumienia. Zapewne podejścia te nie są źródłem żadnych bodźców do zrobienia czegoś w inny sposób, ponieważ tak naprawdę nie ma tam na co patrzeć.

W interpretacjach tych załadowujemy Statek Nauki wszystkimi danymi empirycznymi, jakie zebraliśmy, zakodowujemy je w biernych odwzorowaniach i płyniemy prosto na skalistą płyciznę Scylli, promieniejąc samozadowoleniem z cokolwiek próżnego instrumentalizmu.

99 Erwin Schrödinger, list do Alberta Einsteina, 7 czerwca 1935 roku. Cyt. za: Arthur Fine, op. cit., s. 66–67.

100 Albert Einstein, list do Erwina Schrödingera, 19 czerwca 1935 roku, ibidem, s. 69.

101 Karl R. Popper, *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Unwin Hyman, Londyn 1982, s. 99–100.

102 Cyt. za: Andrew Whitaker, *John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics: Vision and Integrity*, Oxford University Press, Oksford 2016, s. 57.

103 Więcej na temat Rovellego, Smolina i pętlowej grawitacji kwantowej zob. w: Jim Baggott, *Przestrzeń kwantowa*, op. cit.

104 Lee Smolin, kontakty osobiste, 21 czerwca 2017 roku. Cyt. za: ibidem, s. 245. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

105 Carlo Rovelli, *Relational Quantum Mechanics*, „International Journal of Theoretical Physics" 1996, nr 35, s. 1637; arXiv: quant-ph/9609002v2, 24 lutego 1997 roku, s. 1.

106 Ibidem, s. 3.

107 Matteo Smerlak i Carlo Rovelli, *Relational EPR*, „Foundations of Physics" 2007, nr 37, s. 427–445; arXiv:quant-ph/0604064v3, 4 marca 2007 roku, s. 3.

108 Carlo Rovelli, kontakty osobiste, 14 października 2018 roku.

109 Matteo Smerlak i Carlo Rovelli, op. cit., s. 5.

110 Carlo Rovelli, *Relational Quantum Mechanics*, op. cit., s. 4.

111 Chyba że dwie cząstki w jakiś sposób komunikują się z prędkością większą od prędkości światła, łamiąc jeden z fundamentalnych postulatów szczególnej teorii względności Einsteina (nikt przy zdrowych zmysłach sobie tego nie wyobraża).

112 W rozdziale 7 zobaczymy, jak prawdziwe pomiary są wykonywane w rzeczywistych laboratoriach celowo, aby testować w taki sposób mechanikę kwantową.

113 Anton Zeilinger, *A Foundational Principle for Quantum Mechanics*, „Foundations of Physics" 1999, nr 29, s. 633.

114 Zob. Jeffrey Bub, *Quantum Mechanics Is about Quantum Information*, „Foundations of Physics” 2005, nr 35, s. 541–560. Zob. też: arXiv:quant-ph/0408020v2, 12 sierpnia 2004 roku.

115 Matteo Smerlak i Carlo Rovelli, op. cit., s. 5.

116 Ibidem, s. 4.

117 Cyt. za: Aage Petersen, op. cit., s. 12.

118 Alfred J. Ayer (red.), *Logical Positivism*, „Library of Philosophical Movements” (Free Press of Glencoe, 1959), s. 11. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

119 Ludwig Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, przeł. Bogusław Wolniewicz, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.

120 N. David Mermin, *Could Feynman Have Said This?*, „Physics Today”, maj 2004, s. 10–11.

ROZDZIAŁ 6

Mechanika kwantowa jest kompletna

Ale musimy ją ponownie zinterpretować

Jeszcze raz o prawdopodobieństwie kwantowym: rozsądne aksjomaty, spójne historie i QBism

Dokąd zmierzamy?

Być może mimo implikacji interpretacji kopenhaskiej, relacyjnej mechaniki kwantowej oraz interpretacji opartych na teorii informacji nadal nie mamy ochoty sugerować, że formalizm kwantowy jest w jakikolwiek sposób niepełny. Może znajdziemy jakieś ukojenie w poszukiwaniu sposobu na ponowną interpretację tego, co mówi teoria? Takie podejście ma tę przewagę, że unikniemy zbytniego grzebania w równaniach, które, jak wiemy, doskonale się sprawdzają. Zamiast tego skrupulatnie zweryfikujemy faktyczne *znaczenie* niektórych występujących w tych równaniach symboli. To niekoniecznie doprowadzi nas do przyjęcia bardziej realistycznego stanowiska, ale być może pozwoli powiedzieć coś więcej o leżącej głębiej fizyce, którą te symbole mają odzwierciedlać.

Jako punkt wyjścia przyjmijmy po prostu, że mechanika kwantowa wydaje się teorią z natury probabilistyczną oraz że jest oparta na zbiorze aksjomatów. Czy jest możliwe, że zamiast zmagać się z interpretacją teorii, całkiem ją przebudujemy na podstawie *innego* zbioru aksjomatów, tak by nadać jej koncepcjom głębsze znaczenie?

Z pewnością tak właśnie uważał teoretyk Lucien Hardy. W 2001 roku zamieścił w arXiv – elektronicznym archiwum preprintów – artykuł przedstawiający „pięć rozsądnych aksjomatów", z których, jak dowodził, można wyprowadzić całą mechanikę kwantową[121]. W niczym nie przypominają one tych, które zaprezentowałem pod koniec rozdziału 4. Zniknął aksjomat zupełności, czyli „nie ma tu na co patrzeć". Zniknęły aksjomaty „odpowiedni zbiór kluczy" i „otwórz pudełko". Nie ma założenia w postaci reguły Borna jako takiej.

Hardy dowodził, że cechą, która rzeczywiście w szczególny sposób odróżniała mechanikę kwantową od teorii ją poprzedzających, jest jej probabilistyczny charakter. Dlaczego więc nie zapomnieć wszystkiego o dualizmie korpuskularno-falowym, funkcjach falowych, operatorach i obserwablach i nie zrekonstruować jej jako uogólnionej postaci teorii prawdopodobieństwa? W istocie cztery pierwsze z rozsądnych aksjomatów Hardy'ego służą zdefiniowaniu struktury *klasycznego* prawdopodobieństwa, takiego samego jak to, którym z powodzeniem posłużylibyśmy się do opisu przewidywanych wyników rzutu monetą. To piąty aksjomat, zakładający, że przejścia między stanami kwantowymi są ciągłe i odwracalne, rozszerza podstawy o możliwość uwzględnienia prawdopodobieństwa kwantowego[122]. Reszta mechaniki kwantowej gładko wynika z tych założeń, wraz z regułą Borna.

Na pierwszy rzut oka piąty aksjomat Hardy'ego sprawia wrażenie raczej sprzecznego z intuicją. Założenie, że przejścia między stanami kwantowymi zachodzą stopniowo, gładko narastając, wydaje się dziwne w teorii, która charakteryzuje się *nieciągłościami*. Ale to konieczne, by zbudować scenariusz, który po prostu nie mógłby się wydarzyć w fizyce klasycznej. Orzeł nie może w sposób ciągły i odwracalny zmienić się w reszkę. Natomiast stany kwantowe $\uparrow$ i $\downarrow$ mogą. Piąty aksjomat Hardy'ego dopuszcza możliwość superpozycji kwantowej, splątania i całej związanej z nimi zabawy. Natomiast nieciągłość kwantowa interpretowana jest bardzo prosto jako transformacja naszej wiedzy z dwóch możliwości (*albo* $\uparrow$, *albo* $\downarrow$) w jeden faktyczny stan rzeczy, zupełnie jak wtedy, gdy rzucamy monetą i widzimy, że upadła orłem do góry.

Artykuł Hardy'ego podąża tropem swoistej tradycji prób rekonstrukcji mechaniki kwantowej i jego publikacja na nowo rozbudziła zainteresowanie takim ogólnym podejściem. Zauważ jednak, że jakakolwiek rekonstrukcja mechaniki kwantowej jako ogólnej teorii prawdopodobieństwa pozwoliłaby nam powiedzieć coś istotnego o tym, co do niej wchodzi i co z niej wychodzi, ale nie mówi absolutnie nic o tym, co się dzieje pomiędzy. „Nie określono, czym jest układ fizyczny, i nie ma to znaczenia dla wyników", wyjaśnia Giulio Chiribella. Tego rodzaju teorie probabilistyczne „są składnią teorii fizycznych, która zostaje po tym, gdy zedrzemy z nich semantykę"[123].

Nadal nie ma tu na co patrzeć.

Być może skłaniamy się ku konkluzji, że pośpieszne dążenie do przyjęcia struktury całkowicie probabilistycznej grozi wylaniem dziecka z kąpielą, gdyż stracimy z pola widzenia wszelką fizykę, jaka kryje się w teorii konwencjonalnej. Czy zamiast pozbywać się wszystkich konwencjonalnych aksjomatów, nie dałoby się postąpić ciut bardziej selektywnie?

Przyjrzyj się ponownie aksjomatom wymienionym pod koniec rozdziału 4 i w dodatku. Jeżeli akceptujemy założenie, że funkcja falowa pozwala na sformułowanie pełnego opisu (Aksjomat Pierwszy), to musimy zbadać nasze odczucia względem pozostałych. Wydaje się, że niewiele zyskamy, negując aksjomaty „odpowiedni zbiór kluczy", „otwórz pudełko" oraz „jak stamtąd znalazła się tutaj", jako że z całą pewnością są one niezbędne, jeśli chcemy zachować pewną przewidywalność i wydobyć z funkcji falowej właściwe informacje. Nasza uwaga nieuchronnie kieruje się ku Aksjomatowi Czwartemu, czyli regule Borna („co możemy otrzymać?"), ponieważ to w nim wyczuwamy pewną słabość.

W mechanice kwantowej mamy skłonność do interpretowania reguły Borna w kategoriach prawdopodobieństw kwantowych ustalonych w odniesieniu do chwili pomiaru. Powód takiego postępowania jest prosty i jednoznaczny. Niezależnie od tego, czy interpretujemy funkcję falową realistycznie, czy nie, gdy stosujemy równanie falowe Schrödingera, otrzymujemy opis ruchu, który zgodnie z Aksjomatem Piątym odbywa się w sposób płynny i ciągły.

Postać funkcji falowej w określonej chwili może być wykorzystana do przewidzenia jej postaci jakiś czas później. W tym sensie równanie Schrödingera działa w bardzo podobny sposób jak klasyczne równania ruchu. Tylko gdy wprowadzamy oddziaływanie lub jakiś rodzaj przejścia, które zmienia stan układu kwantowego, stajemy w obliczu nieciągłości – elektron „przeskakuje" na jakąś orbitę o wyższej energii albo funkcja falowa ulega redukcji do takiego wyniku pomiaru lub innego, w zależności od tego, jak upadną kości, kolejny raz rzucone przez Boga. Ta nieciągłość nie pojawia się – po prostu nie może – nigdzie w równaniu Schrödingera.

To powód, dla którego do aksjomatów zaliczono regułę Borna. W samym formalizmie nie ma niczego, co jednoznacznie powiedziałoby nam, że tak działa natura. Stosujemy regułę Borna, ponieważ próbujemy w ten sposób nadać sens wpisanej w fizykę kwantową nieprzewidywalności. Istnieją dwa wyniki pomiaru układu kwantowego, lecz my nie potrafimy z całą pewnością przewidzieć, który z nich pojawi się w każdym pojedynczym pomiarze. Wykorzystujemy regułę Borna, by ukryć naszą ignorancję i udawać, że tak naprawdę wiemy, o co tutaj chodzi. Możemy to zrobić, jedynie *zakładając*, że jest ona prawdziwa.

W konwencjonalnej mechanice kwantowej zakładamy, że prawdopodobieństwo kwantowe jest bezpośrednią konsekwencją procesu pomiaru. A co, jeśli tego nie zrobimy? Co, jeśli odrzucimy konwencjonalną interpretację reguły Borna lub znajdziemy inne, bardziej wnikliwe wyjaśnienie pozornie nieuniknionej i nieodłącznej losowości kwantowego świata?

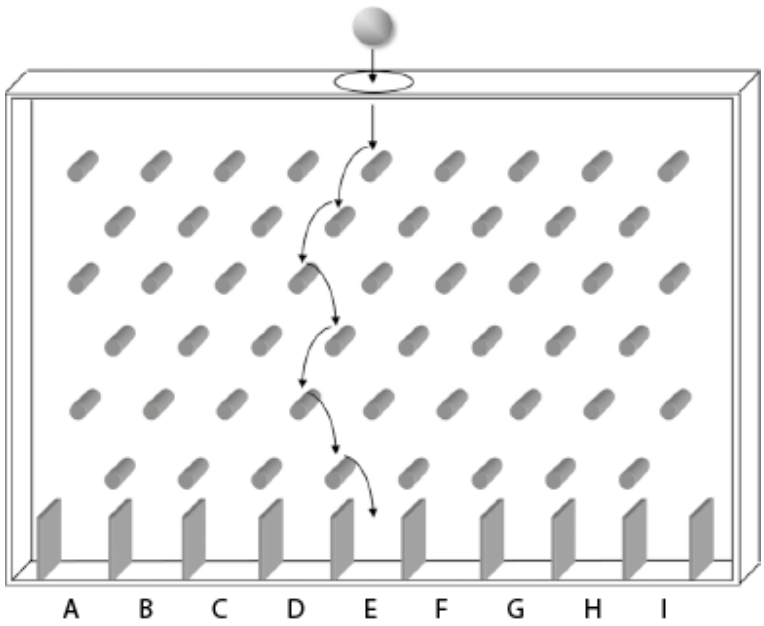
Postawmy sprawę jasno. Obliczanie prawdopodobieństwa uzyskania określonego wyniku pomiaru z kwadratu całkowitej funkcji falowej jest metodą głęboko zakorzenioną w świadomości fizyków posługujących się mechaniką kwantową i nikt nie sugeruje, że powinno się z tego zrezygnować. Zamiast tego sugerujemy tylko, żeby nie traktować reguły Borna wyłącznie jako mechanizmu rachunkowego, który należy przyjąć, ponieważ układy kwantowe oddziałują z naszymi instrumentami klasycznymi, ale raczej jako nieuchronną *konsekwencję* leżącej głębiej fizyki kwantowej albo sposobu, w jaki my, istoty ludzkie, tę fizykę *postrzegamy*. Tak czy

siak, oznacza to zmianę podejścia do myślenia o prawdopodobieństwie kwantowym.

Zaczniemy od przyjrzenia się pierwszej alternatywie.

Jak przekonaliśmy się wcześniej, filozof Karl Popper do pewnego stopnia podzielał skłonność Einsteina i Schrödingera do realizmu, a z jego pism dotyczących mechaniki kwantowej jasno wynika, że stał w opozycji do interpretacji kopenhaskiej, w szczególności do pozytywizmu Heisenberga. Jeśli chodzi o Poppera, to cała afera wokół paradoksów kwantowych była rezultatem błędnego rozumienia natury i roli prawdopodobieństwa.

W celu wyjaśnienia, co ma na myśli, Popper posłużył się rozbudowaną analogią. Rysunek 11 przedstawia drewnianą tablicę z siatką wbitych w nią metalowych szpilek. Tablicę zamknięto w pudełku z przezroczystą ścianką, tak że możemy obserwować, co się dzieje, gdy z góry, w sieć szpilek, zostaje wrzucona mała szklana kulka dobrana w taki sposób, by idealnie mieściła się w odstępie między dwiema dowolnymi, sąsiadującymi ze sobą szpilkami, jak pokazano na rysunku. Kulka, uderzając w szpilkę, może odskoczyć albo w lewo, albo w prawo. Trasa kulki stanowi więc sekwencję losowych skoków w lewo/prawo, gdy odbija się od kolejnych szpilek. Mierzymy położenie kulki u dołu tablicy, gdy skończy ruch.



Rysunek 11. Tablica ze szpilkami Poppera

Powtarzanie pomiarów z jedną kulką (lub „wiązką” identycznych kulek) pozwala nam ustalić częstotliwość, z jaką poszczególne kulki lądują w określonych rynienkach na dole. Wraz ze wzrostem liczby pomiarów częstotliwości te dążą do ustalonego wzorca, który możemy interpretować w kategoriach prawdopodobieństwa statystycznego. Jeżeli wszystkie kolejne kulki wpadają do sieci w tym samym miejscu, a szpilki są identyczne, to spodziewalibyśmy się równomiernego rozkładu prawdopodobieństwa, z maksimum w okolicach centrum i spadkiem ku lewej i prawej stronie. Kształt tej krzywej rozkładu odzwierciedla fakt, że prawdopodobieństwo sekwencji, w której jest mniej więcej tyle samo odbić w lewo co w prawo, jest większe niż prawdopodobieństwo otrzymania sekwencji, w której kulka przeważnie odskakuje w lewo lub przeważnie w prawo.

Wnioskujemy stąd, że prawdopodobieństwo, iż dana kulka pojawi się w dowolnej rynience u dołu (powiedzmy E), będzie zależało od prawdopodobieństwa każdego z odbić lewo/prawo w sekwencji. Rysunek 11 pokazuje sekwencję lewo-lewo-prawo-lewo-prawo-prawo, która lokuje kulkę w rynience E. Zatem prawdopodobieństwo określonego wyniku pomiaru jest wyznaczone przez *łańcuch prawdopodobieństw* w każdym bez wyjątku kroku sekwencji zdarzeń, które się na niego złożyły. Jeżeli nazwiemy taką sekwencję zdarzeń „historią”, to zauważymy, że jest więcej niż jedna historia, która lokuje kulkę w rynience E. Równie dobrze może to być sekwencja prawo-lewo-lewo-prawo-lewo-prawo oraz prawo-prawo-prawo-lewo-lewo-lewo.

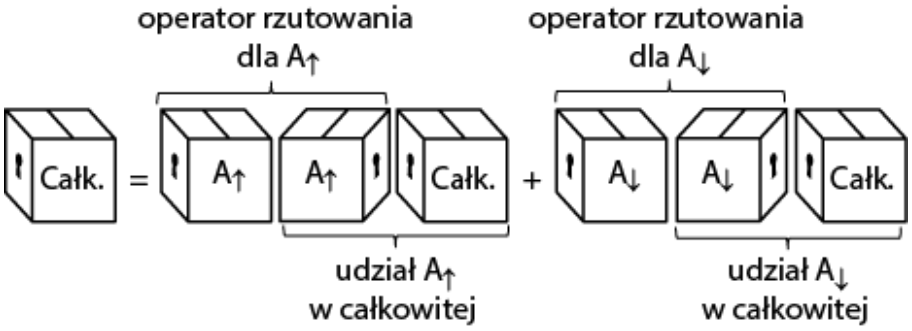
Popper dowodził, że chcąc zmienić *skłonność* układu do wytwarzania określonego rozkładu prawdopodobieństwa, wystarczy odchylić tablicę o pewien kąt lub usunąć jedną szpilkę. Jak pisał:

> [Usunięcie jednej szpilki] zmieni prawdopodobieństwo w każdym pojedynczym doświadczeniu z każdą pojedynczą kulką, *niezależnie od tego, czy kulka rzeczywiście przechodzi w pobliżu miejsca, z którego tę szpilkę usunęliśmy*[124].

Zatem w konwencjonalnej mechanice kwantowej wprowadzamy losowość kwantową w chwili, w której zachodzi oddziaływanie lub pomiar. A co, jeśli świat kwantowy jest z natury probabilistyczny w *każdym* momencie? Jeśli, jak w przykładzie Poppera z tablicą ze szpilkami, prawdopodobieństwo danego wyniku pomiaru odzwierciedla łańcuch prawdopodobieństw zdarzeń w każdej historii, która go wywołuje?

Nieco łatwiej jest myśleć o tym w kontekście bardziej oczywistego przykładu kwantowego. Powróćmy więc jeszcze raz do naszego ulubionego układu kwantowego (cząstki A), wprowadzonego wstępnie w superpozycję stanów ↑ i ↓. Podłączamy urządzenie pomiarowe do miernika ze wskazówką, która przechyla się w lewo, , gdy pomiar wykaże, że A znajduje się w stanie ↑ ($A_{\uparrow}$), i w prawo , gdy pomiar wykaże, że A znajduje się w stanie ↓ ($A_{\downarrow}$).

W dalszej części nie będziemy skupiać się na funkcji falowej jako takiej, ale na konstrukcji opartej na funkcji falowej, którą – w języku piktogramów stosowanych do tej pory – można (z grubsza) przedstawić następująco:



Zastosowałem w tym wyrażeniu na całkowitej funkcji falowej tak zwane *operatory rzutowania*, wyprowadzone z funkcji falowych $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$. Pomyśl o tych operatorach jako o mechanizmach matematycznych, które pozwalają nam „mapować” całkowitą funkcję falową na „przestrzeni” zdefiniowanej na bazie funkcji $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$[125]. Jeżeli to pomoże, możesz porównać ten proces do rzutowania elementów powierzchni (niemal sferycznej) Ziemi na płaski, prostokątny diagram. Najbardziej znanym przykładem jest

odwzorowanie Merkatora, które jednak zalety dwuwymiarowości uzyskuje kosztem dokładności, wskutek czego obszary w pobliżu biegunów, takie jak Grenlandia i Antarktyda, wydają się większe niż w rzeczywistości.

Wspomniane rzutowanie kwantowomechaniczne polega na tym, że „czoło" każdego operatora rzutowania łączy się z całkowitą funkcją falową, dając liczbę, która odpowiada po prostu *udziałowi* tej funkcji w całkowitej funkcji falowej. „Tył" każdego operatora rzutowania to funkcja falowa sama w sobie. Tym, co otrzymujemy na koniec, jest więc zwykła suma. Całkowita funkcja falowa dana jest jako suma iloczynu udziału $A_{\uparrow}$ i funkcji falowej $A_{\uparrow}$ oraz iloczynu udziału $A_{\downarrow}$ i funkcji falowej $A_{\downarrow}$. Do tej pory zakładaliśmy w naszych rozważaniach, że te udziały są równe, i nadal będziemy się tego trzymać.

Wiem, że to wygląda jak niepotrzebna komplikacja, ale operatory rzutowania przybliżają nas o krok do rzeczywistych własności ($\uparrow$ i $\downarrow$) układu kwantowego i można dowieść, że są bardziej znaczące niż same funkcje falowe.

Jak powinniśmy myśleć o własnościach układu (odzwierciedlanych przez jego operatory rzutowania), który ewoluuje w czasie w trakcie procesu pomiaru? By nieco uprościć nasze rozważania, weźmy pod uwagę tylko trzy kluczowe momenty: całkowity układ (układ kwantowy plus pomiar) w pewnej chwili początkowej tuż po przygotowaniu (oznaczymy go jako czas t_0), układ jakiś czas później, tuż przed dokonaniem pomiaru (t_1), i układ po dokonaniu pomiaru (t_2). Otrzymamy wynik pomiaru, będący rezultatem sekwencji lub „historii" zdarzeń kwantowych.

Ciekawostką jest fakt, że historia, którą wiążemy z konwencjonalną mechaniką kwantową, nie jest jedyną historią zgodną z tym, co widzimy w laboratorium, tak jak istniały różne historie, które na tablicy ze szpilkami Poppera kończyły bieg kulki w rynience E.

W interpretacji *spójnych historii*, opracowanej po raz pierwszy w 1984 roku przez fizyka Roberta Griffithsa, historie te tworzą „rodziny" lub, jak wolał nazywać je Griffiths, „struktury".

W przypadku rozważanego tutaj procesu pomiaru możemy wskazać co najmniej trzy różne struktury. W Strukturze 1 zaczynamy w czasie t_0 z początkową superpozycją kwantową stanów $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$ oraz urządzeniem pomiarowym (które będziemy dalej nazywać miernikiem) znajdującym się w „neutralnym" stanie przed pomiarem. Zakładamy, że w wyniku jakiegoś spontanicznego procesu przed upływem czasu t_1 układ ewoluował, w wyniku czego doszło do splątania jednego ze stanów $A_{\uparrow}$ lub $A_{\downarrow}$ z miernikiem w stanie neutralnym. Pomiar, który zachodzi w czasie t_2, gdy wskazówka miernika odchyla się albo w lewo, albo w prawo, zależy od tego, który stan jest już obecny.

Czas	**Struktura 1**	**Struktura 2**	**Struktura 3**
t_0	($A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$)	($A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$)	($A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$)
t_1	$A_{\uparrow}$ lub $A_{\downarrow}$	$A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$	$A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$
t_2	$A_{\uparrow}$ lub $A_{\downarrow}$	$A_{\uparrow}$ lub $A_{\downarrow}$	$A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$

Struktura 2 jest najbliższa temu, co podpowiada nam na temat owego procesu konwencjonalny formalizm kwantowy. W tej rodzinie historii początkowa superpozycja ulega splątaniu z miernikiem, by w chwili t_2 wyraźnie rozdzielić się na odrębne stany $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$, gdy wyobrażamy sobie bądź zakładamy, że zachodzi „kolaps". Taki kolaps nie występuje w Strukturze 3, w której stany $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$ są splątane w chwili t_2, wytwarzając makroskopową superpozycję kwantową (znaną również, z oczywistych powodów, jako stan kota Schrödingera).

Te różne struktury są w naturalny sposób spójne, lecz wzajemnie się wykluczają. Stosując regułę Borna, możemy różnym historiom *wewnątrz* każdej struktury przypisać prawdopodobieństwo i to czyni je spójnymi. Jednak, jak wyjaśnia Griffiths: „W mechanice kwantowej

często zdarza się tak, że istnieją różne niekompatybilne struktury, którymi można posłużyć się do analizy określonej sytuacji. Fizycy mogą zastosować dowolną z nich lub rozważać kilka różnych”[126]. Każda z nich stanowi poprawny opis zdarzeń, ale są one różne i nie można ich ze sobą łączyć.

Ta interpretacja sprawia zarazem, że wszelkie debaty na temat granicy między światem kwantowym a klasycznym – „podejrzany podział” Bella – stają się nieistotne. Wszystkie struktury są jednakowo poprawne, a fizycy mogą przebierać w nich jak w ulęgałkach, szukając takiej, która będzie najlepiej pasowała do interesującego ich problemu. Oczywiście, trudno oprzeć się pokusie, by zadać pytanie: Ale która struktura jest „właściwa”? W interpretacji spójnych historii nie ma takiej. Tak jak nie ma „właściwej” funkcji falowej ani „uprzywilejowanej” bazy.

Czy jednak zmiana stanu fizycznego, sugerowana zdarzeniami zachodzącymi między chwilą t_0 a t_1 w Strukturze 1 i między chwilą t_1 a t_2 w Strukturze 2, nie oznacza nadal czegoś w rodzaju kolapsu? Nie, nie oznacza:

> Innym sposobem na uniknięcie tej trudności jest myślenie o kolapsie funkcji falowej nie jako o efekcie fizycznym, spowodowanym aparaturą pomiarową, ale jako o matematycznej procedurze obliczania korelacji statystycznych [...] Inaczej mówiąc, „kolaps” jest raczej czymś, co występuje w notesie teoretyka niż w laboratorium eksperymentatora[127].

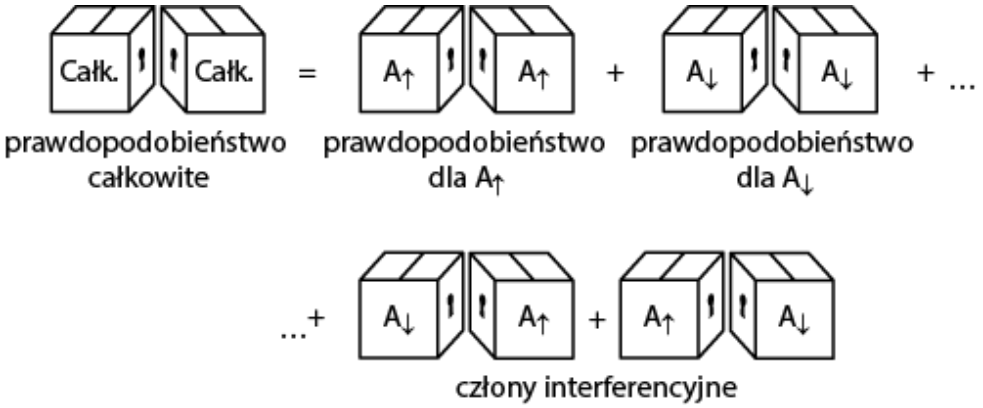
Dzięki naszym wcześniejszym rozważaniom na temat interpretacji relacyjnej i interpretacji opartych na teorii informacji wiemy już, co to oznacza. W interpretacji spójnych historii funkcje falowe (a więc również wyprowadzone z nich operatory rzutowe) nie są realne. Griffiths traktuje funkcję falową jako twór czysto matematyczny, *preprawdopodobieństwo*, które umożliwia obliczenie prawdopodobieństwa kwantowego w obrębie każdej struktury. Możemy stąd wywnioskować, że interpretacja spójnych historii jest

antyrealistyczna. Wiąże się to z odrzuceniem Trzeciego Sądu Logicznego.

Największa siła interpretacji spójnych historii ujawnia się w problemach innego rodzaju. Cofnijmy się do eksperymentu z interferencją elektronów na dwóch szczelinach. Załóżmy teraz, że posługując się słabym źródłem niskoenergetycznych fotonów, próbujemy wykryć, przez którą szczelinę przechodzi każdy elektron. Fotony nie spychają elektronów z ich trajektorii, ale rozpraszając się na tej czy innej szczelinie, sygnalizują nam, którą drogę wybrał elektron. Pozwalamy eksperymentowi trwać i przewidujemy, że pojawiające się na fosforescencyjnym ekranie jasne plamki złożą się na wzór interferencyjny (rysunek 4). Tym sposobem ujawnimy obydwa typy zachowań, korpuskularne („Którą drogę pokonał?”) *i* falowe, pod postacią interferencji, w tym samym czasie.

Nie tak szybko. W interpretacji spójnych historii łatwo jest wykazać, że zachowania typu „która droga” i interferencja należą do różnych, niekompatybilnych struktur. Jeżeli potraktujemy te alternatywy jako „historie korpuskularne” (z trajektoriami „która droga”) lub „historie falowe” (z efektem interferencji), to okaże się, że interpretacja spójnych historii zasadniczo jest ponownym sformułowaniem zasady komplementarności Bohra wyrażonym językiem prawdopodobieństwa. Po prostu nie ma takiej struktury, w której jednocześnie mogą wystąpić własności cząsteczkowe i falowe. W tym sensie interpretacja spójnych historii nie jest pomyślana jako alternatywa, ale jako „w pełni spójne i jasne sformułowanie mechaniki kwantowej, »interpretacja kopenhaska zrobiona jak należy«”[128].

Jest jednak pewien problem. Jeżeli ustalając prawdopodobieństwa różnych historii wewnątrz każdej struktury, polegamy na regule Borna, to musimy pogodzić się z faktem, że wyniki takiej algebry są niepodważalnie prawdziwe. Zanim dojdzie do interakcji z urządzeniem pomiarowym, kwadrat całkowitej funkcji falowej może zawierać „człony mieszane” lub „człony interferencyjne”:



Jak sugeruje nazwa, człony interferencyjne są odpowiedzialne za interferencję, i to właśnie taką, jaką obserwujemy w doświadczeniu z dwiema szczelinami, w postaci naprzemiennych jasnych i ciemnych prążków. W konwencjonalnej mechanice kwantowej kolaps funkcji falowej oznacza nie tylko losowy wybór między wynikami $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$, lecz także zniknięcie członów interferencyjnych.

Możemy obserwować efekt interferencji, wykorzystując światło albo elektrony, ewentualnie (jak przekonamy się w rozdziale 8) duże cząsteczki lub małe nadprzewodzące pierścienie. Jednak oczywiste jest, że nie obserwujemy jakiejkolwiek interferencji dużych obiektów laboratoryjnych, takich jak wskazówki mierników czy koty. Musimy więc znaleźć mechanizm, który to wyjaśni.

Bohr zakładał istnienie granicy między światem kwantowym a klasycznym, nie precyzując nigdy, gdzie miałaby biec i jak działać. Wiemy jednak, że każde klasyczne urządzenie pomiarowe musi się składać z obiektów kwantowych, takich jak atomy i molekuły. Dlatego spodziewamy się, że pierwsze etapy oddziaływania między układem kwantowym a detektorem klasycznym prawdopodobnie są natury kwantowej. Następnie możemy oczekiwać, że początkowa interakcja ulegnie zwielokrotnieniu, powodując szybki przyrost *liczby* zaangażowanych stanów kwantowych i przekształcając się w sygnał zauważalny dla ludzkiego obserwatora – być może jasną plamkę na ekranie fosforescencyjnym albo zmianę ustawienia wskazówki miernika.

W przykładzie, który rozważaliśmy wcześniej, obecność w detektorze cząstki A w stanie $\uparrow$ uruchamia lawinę coraz bardziej

złożonych oddziaływań, z tym że każdym kolejnym krokiem sekwencji rządzi prawdopodobieństwo. Choć każda interakcja z osobna w zasadzie jest odwracalna, cały proces szybko zostaje przytłoczony „szumem” i złożonością środowiska, wskutek czego *wydaje się* nieodwracalny. Podobnie, choćbyśmy nie wiadomo jak długo czekali, rozbity na podłodze kieliszek nie złoży się spontanicznie w całość, mimo że w klasycznej teorii mechaniki statystycznej nie ma niczego, co by tego zabraniało.

Ten efekt „zmywania” interferencji kwantowej wraz ze wzrostem skali i stopnia złożoności procesu pomiaru nosi nazwę *dekoherencji*. W 1991 roku Murray Gell-Mann i James Hartle rozszerzyli warunki spójności interpretacji spójnych historii, właśnie po to, żeby wyjaśnić stłumienie członów interferencyjnych w wyniku dekoherencji. Obecnie interpretacja ta coraz częściej nazywana jest *interpretacją dekoherentnych historii*.

Do dekoherencji jeszcze wrócimy. Przy okazji chciałbym jednak zauważyć, że jest to *mechanizm* służący przekładaniu zjawisk w mikroskopowej skali kwantowej na obiekty, które obserwujemy w naszej skali makroskopowej, zaprojektowany w taki sposób, by po drodze eliminować wszelkie kwantowe dziwactwa. Przekonamy się, że dekoherencja występuje w wielu różnych interpretacjach. W tym konkretnym przypadku jest wykorzystywana jako dość ogólna, nieco abstrakcyjna technika matematyczna „czyszcząca” prawdopodobieństwa produkowane przez człony interferencyjne. Jest to całkowicie zgodne z poglądem, że funkcja falowa jest preprawdopodobieństwem i jako taka nie jest realna fizycznie. Inne interpretacje, polegające na bardziej realistycznym postrzeganiu funkcji falowej, posługują się dekoherencją jako realnym procesem fizycznym.

Na koniec jeszcze jedno. Dekoherencja uwalnia nas od członów interferencyjnych. Jednak nie wymusza wyboru wyniku pomiaru (*albo* $A_{\uparrow}$, *albo* $A_{\downarrow}$), który nadal jest pozostaje losowy. Einstein nie byłby zadowolony.

Tym, co zmotywowało Gell-Manna i Hartle’a do poszukiwania alternatywy dla interpretacji kopenhaskiej, był fakt, że jak się

wydaje, przywiązuje ona szczególną wagę do procesu pomiaru. Było to dość niewygodne dla wyłaniającej się wówczas kosmologii kwantowej – w której mechanika kwantowa jest stosowana do całego Wszechświata – ponieważ, z definicji, „na zewnątrz" Wszechświata teoretycznie może nie być niczego, co mogłoby poddać go pomiarowi. Interpretacja dekoherentnych historii rozwiązuje ten problem w ten sposób, że nie przypisuje pomiarowi większego znaczenia niż dowolnemu innemu zdarzeniu kwantowemu.

Interpretacja ta była promowana przez małą, lecz wpływową międzynarodową grupę fizyków, w tej liczbie Griffithsa, Rolanda Omnèsa, Gell-Manna i Hartle'a, i zainteresowanie nią rosło.

Jednak rosły również obawy.

W 1996 roku teoretycy Fay Dowker i Adrian Kent wskazali na liczne problemy ze strukturami, które się pojawiają, gdy przenosimy je w skalę klasyczną. O ile historia świata, który znamy, rzeczywiście może być historią spójną, o tyle nie jest jedyną historią dopuszczaną przez tę interpretację[129]. Jest również nieskończenie wiele innych historii. Ponieważ wszystkie zdarzenia wewnątrz każdej historii mają charakter probabilistyczny, niektóre z tych historii obejmują podobną sekwencję zdarzeń, a potem nagle zmieniają się w całkiem obcą sekwencję. Są takie historie, które teraz są klasyczne, lecz kiedyś w przeszłości były superpozycją innych klasycznych historii, co podsuwa myśl, że znalezienie dzisiaj skamieniałości dinozaurów nie daje nam podstaw do konkluzji, iż dinozaury przemierzały Ziemię sto milionów lat temu.

Ponieważ nie ma jednej „właściwej" struktury, która wyłaniałaby się jako unikatowy efekt działania jakiegoś prawa natury, interpretacja uważa wszystkie możliwe struktury za jednakowo poprawne, a wybór zależy od rodzaju postawionego pytania. Jak się zdaje, skazuje to nas na silną zależność od kontekstu, gdy nasza zdolność rozumienia zjawisk fizycznych zależy od umiejętności postawienia „właściwego" pytania. Podobnie jak komputer Głęboka Myśl w powieści Douglasa Adamsa *Autostopem przez Galaktykę*, zbudowany po to, by znaleźć odpowiedź na pytanie o „życie, wszechświat i całą resztę", zostaliśmy zaopatrzeni w *odpowiedź*[130],

musimy tylko mieć nadzieję, że potrafimy nadać jej sens, gdy zdołamy precyzyjniej sformułować *pytanie*.

Griffiths przyznał, że obawy Dowkera i Kenta są uzasadnione, ale stwierdził, że to cena, jaką musimy zapłacić. Interpretacja dekoherentnych historii jest

> sprzeczna z podzielaną przez filozofów, fizyków i przysłowiowych ludzi z ulicy głęboko zakorzenioną wiarą lub intuicją, że w dowolnym punkcie czasowym jest jeden i tylko jeden stan wszechświata, który jest „prawdziwy" i z którym musi zgadzać się każde prawdziwe stwierdzenie na temat świata. Jeżeli interpretacja historii teorii kwantowej jest na właściwym tropie, tę intuicję trzeba odrzucić[131].

Odkryłem, że czasem w takiej sytuacji warto się wycofać. Może zrobię sobie kolejną filiżankę herbaty, przestanę myśleć o mechanice kwantowej i będę miał nadzieję, że dręczący mnie ból głowy minie.

W takich chwilach cichej refleksji umysł wędruje myślami (jak często to robi) do stanu moich osobistych finansów. Cóż, uważam się za osobę rozsądną. Stając wobec wyboru między dwiema czynnościami, będę skłaniał się ku tej, która maksymalizuje pewne spodziewane korzyści, takie jak osobisty majątek. Wydaje się to proste, jednak świat jest miejscem złożonym i często nieprzewidywalnym, zwłaszcza w epoce Trumpa i brexitu. Już jakiś czas temu zrozumiałem, że kupowanie co tydzień kuponu na loterię narodową nie jest dobrym planem emerytalnym. Jednak poza tak oczywistymi sytuacjami skąd ktokolwiek z nas ma wiedzieć, jakie działania podjąć? Powinienem trzymać swoje pieniądze na koncie w banku czy zainwestować je w obligacje rządowe albo na giełdzie papierów wartościowych?

Jako ludzie myślący racjonalnie mamy skłonność do przypisywania każdemu działaniu prawdopodobieństwa i wybieramy tę czynność, która gwarantuje nam najwyższe prawdopodobieństwo uzyskania określonej korzyści. Niekoniecznie dokładnie obliczamy te prawdopodobieństwa: możemy przyjrzeć się stopom procentowym banków, przestudiować giełdę papierów wartościowych i spróbować

wyrobić sobie racjonalny pogląd, aczkolwiek o charakterze jakościowym. Możemy też kierować się jakimiś w przeważającej mierze subiektywnymi opiniami na temat tych różnych możliwości, biorąc pod uwagę nasze spostrzeżenia i chęć podjęcia ryzyka. Oczywiście, możemy zrzucić ciężar odpowiedzialności za te decyzje na doradcę finansowego, jeśli stać nas na takiego, niemniej zanim wyrazimy zgodę, nadal będziemy chcieli poznać jakieś kryjące się za nimi racje.

Takie pojęcie prawdopodobieństwa jako miary naszej subiektywnej wiary lub niepewności jest przypisywane osiemnastowiecznemu statystykowi, filozofowi i pastorowi prezbiteriańskiemu Thomasowi Bayesowi. W 1812 roku Pierre Simon Laplace nadał podejściu Bayesa nowoczesną formę matematyczną.

Załóżmy, że formułujesz hipotezę, iż pewne twierdzenie może być prawdziwe lub słuszne. W teorii prawdopodobieństwa Bayesa przypisujesz owej hipotezie prawdopodobieństwo tego, że jest słuszna, czyli określasz miarę tego, jak silnie w nią wierzysz. Nazywa się to *prawdopodobieństwem a priori*. Teraz spójrz na nią jeszcze raz, uwzględniając pewien dowód rzeczowy. Prawdopodobieństwo, że twoja hipoteza jest słuszna z uwzględnieniem dowodu rzeczowego, nazywane jest *prawdopodobieństwem a posteriori*.

W tej chwili stajesz przed prostym pytaniem. Czy prawdopodobieństwo *a posteriori* jest większe, czy mniejsze niż prawdopodobieństwo *a priori*? Inaczej mówiąc, czy dowód potwierdza lub co najmniej wspiera twoją hipotezę, czy też ją obala lub służy jej podważeniu? A może jest neutralny? Teoria prawdopodobieństwa Bayesa jest szeroko stosowana w nauce, szczególnie zaś w filozofii nauki, gdzie pomaga analizować, w jaki sposób używamy dowodów, żeby potwierdzić lub obalić teorie naukowe.

Jednak gdy chwilę się nad tym zastanowimy, dojdziemy do wniosku, że w rzeczywistości wszystkie te prawdopodobieństwa są dość *subiektywne*. Mógłbym zacząć wierzyć w jedną rzecz, ale ty spojrzysz na ten sam dowód i uwierzysz w coś całkiem innego. Kto powie, który z nas ma rację? Jesteśmy w stanie poradzić sobie z tego rodzaju subiektywnością w naszym codziennym życiu, ale

z pewnością nie ma na nią miejsca w teoriach fizycznych opartych na *obiektywnych* faktach mówiących o *obiektywnie* istniejącej rzeczywistości (Pierwszy Sąd Logiczny)[132].

Być może to dobry moment, żeby przedstawić bardziej rozbudowaną wersję cytatu z książki Heisenberga:

> Prowadząc badania w dziedzinie fizyki atomowej, dążymy do tego, aby zrozumieć pewne określone zjawisko, aby ustalić, w jaki sposób wynika ono z ogólnych praw przyrody. Dlatego ta część materii lub to promieniowanie, z którymi mamy do czynienia w danym zjawisku, stanowi naturalny „obiekt" teoretycznej interpretacji i powinno być odróżnione od przyrządów służących do badania zjawiska. Ten postulat przypomina nam o elemencie *subiektywizmu* występującym w opisie mikrozdarzeń; przyrząd pomiarowy został bowiem skonstruowany przez obserwatora, musimy więc pamiętać, że tym, co obserwujemy, nie jest przyroda sama w sobie, lecz przyroda, jaka nam się jawi, gdy zadajemy jej pytania we właściwy nam sposób[133].

Gdy naukowcy zajmują się swoimi sprawami – obserwują, eksperymentują, teoretyzują, przewidują, testują i tak dalej – często skłaniają się ku określonemu sposobowi myślenia lub mają z góry ustalone nastawienie. Zwykle zakładają, że nie ma w „nas" niczego wyjątkowego. Nie jesteśmy szczególnie uprzywilejowanymi obserwatorami Wszechświata, który zamieszkujemy. Nie znajdujemy się w centrum wszystkiego. To „zasada kopernikańska": nauka dąży do opisu, w którym nasza egzystencja jest raczej naturalną *konsekwencją* rzeczywistości niż jej *powodem*.

Przypomnij sobie, że jedna z konsekwencji teorii względności Einsteina polega na tym, iż obserwator zostaje ponownie włączony w obserwowaną rzeczywistość. Czy nie powinniśmy zatem zaakceptować przynajmniej potrzeby włączenia eksperymentatora z powrotem w badaną rzeczywistość kwantową? Nie musimy posuwać się aż do sugerowania związku przyczynowego – odrzucać Pierwszego Sądu Logicznego i dowodzić, że Księżyc przestaje istnieć,

gdy nikt na niego nie patrzy lub o nim nie myśli. Być może wystarczy po prostu zaakceptować fakt, że nasz opis naukowy nie będzie pełny dopóty, dopóki sami się w nim solidnie nie osadzimy.

W 2002 roku Carlton Caves, Christopher Fuchs i Rüdiger Schack zaproponowali, żeby tak właśnie zrobić. Zamiast zaprzeczać elementowi subiektywności w mechanice kwantowej, uwzględnili go. Dowodzili, że obliczone za pomocą reguły Borna prawdopodobieństwa kwantowe nie są prawdopodobieństwami obiektywnymi, które w mechaniczny sposób wiążą się z leżącą u podstaw fizyką kwantową. Są to prawdopodobieństwa bayesowskie, odzwierciedlające stopień osobistej, subiektywnej wiary indywidualnych eksperymentatorów, związane jedynie z nabytym przez eksperymentatora *doświadczeniem* fizycznym.

Być może twoim pierwszym odruchem będzie natychmiastowe odrzucenie tej idei. Z pewnością jest ogromna różnica między moimi subiektywnymi przekonaniami na temat giełdy papierów wartościowych a niezbicie obiektywnymi faktami fizycznymi? Moja zdolność przewidywania ruchów na giełdzie jest ograniczona z powodu braku wiedzy i doświadczenia. Jeżeli poświęcę czas na zdobycie większego doświadczenia, pogłębienie swojej wiedzy i zakodowanie tego w kilku użytecznych algorytmach, istnieje spora szansa, że będę w stanie dokonywać bardziej realistycznych przewidywań (wystarczy zapytać Warrena Buffeta).

Czemu fizyka kwantowa miałaby być inna? Przez ostatnie sto lat lub coś koło tego fizycy poświęcali czas na zdobywanie większego doświadczenia i gromadzenie wiedzy na temat układów kwantowych, którą zakodowali w zbiorze równań zwanym przez nich mechaniką kwantową. Dlaczego wierzyć w regułę Borna? Ponieważ tak właśnie zrobi dowolny, racjonalnie myślący fizyk z dostępem do doświadczenia, wiedzy i algorytmów mechaniki kwantowej. „W istocie prawo fizyczne, które określa prawdopodobieństwa kwantowe, ma charakter fundamentalny, ale to dlatego, że jest ono fundamentalną regułą wnioskowania – prawem myślenia – dla prawdopodobieństw bayesowskich”[134].

To interpretacja znana jako kwantowy bayesianizm, określana też skrótem QBism (wymawianym „kjubizm”). Jest w pełni subiektywna.

QBiści postrzegają mechanikę kwantową jako „narzędzie intelektualne pomagające swoim użytkownikom wchodzić w interakcję ze światem w celu przewidywania, kontrolowania i zrozumienia tego, jak go doświadczają”[135]. W 2012 roku, wbrew napomnieniom swojego profesora, na QBism nawrócił się Mermin, uprzednio spędziwszy w towarzystwie Fuchsa i Schacka sześć tygodni w Instytucie Badań Zaawansowanych Uniwersytetu Stellenbosch w Republice Południowej Afryki; jak stwierdził: „w końcu zacząłem rozumieć, co próbowali mi powiedzieć przez ostatnich dziesięć lat”[136].

To podejście wykracza poza regułę Borna, sięgając do samych stanów kwantowych i odpowiadających im funkcji falowych. Równanie Schrödingera po prostu ogranicza wybór sposobu, w jaki racjonalnie myślący fizyk chciałby opisać swoje doznania do czasu, gdy stanie się on świadomy wyniku pomiaru. To żaden problem, z tego samego powodu, z jakiego Rovelli twierdzi, że jego wiedza o Chinach zmienia się każdorazowo, ilekroć postanowi przeczytać o tym kraju jakiś artykuł.

Gdy wskazówka miernika odchyla się w lewo, racjonalna Alicja decyduje się opisać doznanie tego wyniku pomiaru w kategoriach stanu kwantowego $A_{+.}$ Wyraża stopień swojej wiary w ten wynik, wpisując „+” do dziennika laboratoryjnego. Racjonalny Bob, zatrzymany przez szefa projektu naukowego na zewnątrz, na korytarzu, postanawia opisać swoje doznania językiem makroskopowej superpozycji kwantowej obejmującej układ kwantowy, urządzenie pomiarowe, miernik, Alicję i jej dziennik. Gdy w końcu Bob wchodzi do laboratorium, Alicja pokazuje mu swój dziennik, a wtedy doświadczenie oraz przekonania Boba się zmieniają. To jest „pomiar” Boba. Nie obejmuje żadnych układów kwantowych, detektorów ani mierników. Bob dokonuje swojego pomiaru, po prostu patrząc w dziennik Alicji lub zadając jej pytanie. Oczywiście, Bob nie był obecny, gdy Alicja przeprowadzała swój pomiar, ale ufa jej bezgranicznie i stopień jego wiary w wynik pozostaje niezmieniony.

W podejściu tego typu, opartym na subiektywnym doznaniu, ponownie pozbywamy się wszelkich problemów związanych z realistyczną interpretacją funkcji falowej. Prawdopodobieństwo kwantowe jest osobistym sądem na temat fizyki, nie mówi nam niczego o fizyce samej w sobie[137]. Nie ma kolapsu funkcji falowej, z tego prostego powodu, że nie ma żadnych wyników, zanim dokonamy aktu pomiaru (niezależnie od tego, jak jest definiowany): doznania nie mogą istnieć, zanim ich doświadczymy. Nie ma czegoś takiego jak nielokalność i upiorne działanie na odległość: „Mechanika kwantowa w interpretacji QBistów jest lokalna, ponieważ jej jedynym celem jest umożliwienie każdemu pojedynczemu podmiotowi uporządkowania stopni wiary w swoje osobiste doświadczenia. Żaden podmiot nie może się poruszać szybciej niż światło”[138].

Jest to interpretacja „pojedynczego użytkownika”. Doznania i stopnie wiary są unikatowe dla danej jednostki – prawdopodobieństwa bayesowskie nie mają sensu w zastosowaniu do wielu jednostek naraz. Musimy zmierzyć się z faktem, że subiektywny charakter naszych indywidualnych doświadczeń oznacza, iż *wszyscy z konieczności przechowujemy w naszych umysłach odmienne wersje otaczającej nas rzeczywistości*. Jeżeli tak jest w istocie, jak w ogóle możliwa jest jakakolwiek nauka?

Spokojnie. Wersje rzeczywistości, które wszyscy przechowujemy w naszych umysłach, nadal są kształtowane przez doznania, jakich dostarcza nam jedna, zewnętrzna Rzeczywistość Empiryczna. W rezultacie naszych doświadczeń, nauki i komunikacji z innymi ludźmi budujemy coś, co filozof John Searle nazywa *tłem*, o czym krótko wspomniałem w rozdziale 2. To niezwykle szeroka i zróżnicowana dekoracja, na której tle wchodzimy w oddziaływania z zewnętrzną rzeczywistością. To wszystko, czego uczymy się na podstawie doświadczeń i co w swoim codziennym życiu zaczynamy traktować jak oczywistość, społeczną i fizyczną. W tle znajdziemy wszelką ciągłość i regularność, oczekiwanie, że jutro wzejdzie słońce, że znajdziemy rzeczy tam, gdzie je zostawiliśmy, że samochody nie skręcają w drzewa, że banknot dwudziestodolarowy naprawdę wart jest 20 dolarów, a także to, że kiedy przejdziesz na następną stronę,

będzie ona pokryta niezwykle interesującym tekstem, a nie zdjęciami kiełbasek.

Każdy z nas buduje tło, gromadząc zbiór wrażeń mentalnych. Te jednak charakteryzują się ogromnym podobieństwem, wynikającym z obszernego zbioru wspólnych doświadczeń (wraz z doświadczeniem w dziedzinie fizyki kwantowej), wspólnych zasobów wiedzy, powszechnie dostępnych form komunikacji i ludzkiej empatii. To właśnie ogromne *podobieństwo* tego osobistego tła umożliwia ludziom wchodzenie w interakcje.

Podobne, lecz nie takie same. W moim umyśle tkwi rzeczywistość, z którą ja nauczyłem się oddziaływać. Ty nie masz dostępu do tej rzeczywistości, ponieważ nie masz dostępu do mojego umysłu. W twoim umyśle znajduje się rzeczywistość, z którą ty nauczyłeś się oddziaływać. Ja nie mam dostępu do tej rzeczywistości, ponieważ nie mam dostępu do twojego umysłu. Moja rzeczywistość nie jest twoją. Jednak te indywidualne rzeczywistości mają wiele cech wspólnych, takich jak rozumienie, że banknot dwudziestodolarowy to pieniądz albo że jeśli przeprowadzę dany eksperyment, to w 50 procentach przypadków otrzymam wynik $A_{\uparrow}$. Dzięki nadzwyczajnej złożoności naszych codziennych interakcji *postrzegamy te odrębne rzeczywistości jako jedną*.

Najwyraźniej QBism odrzuca Trzeci Sąd Logiczny i na poziomie odzwierciedlenia jest bezwstydnie antyrealistyczny. Nie ma do powiedzenia nic znaczącego na temat leżącej u podstaw naszych doświadczeń fizyki. Po raz kolejny nie ma tu na co patrzeć.

Interpretacja kopenhaska próbuje zrzucić winę za brak dostępności świata kwantowego na nasz klasyczny język i aparaturę. Interpretacja relacyjna Rovellego przenosi odpowiedzialność na potrzebę ustanowienia związku ze stanami kwantowymi, jeżeli mają one zyskać jakiekolwiek znaczenie fizyczne. Interpretacje oparte na teorii informacji robią mniej więcej to samo. W interpretacji spójnych lub dekoherentnych historii wina leży po stronie fundamentalnie probabilistycznej natury wszystkich zdarzeń kwantowych i braku reguły, która pozwoliłaby ustalić „właściwą” strukturę.

W QBismie *cała fizyka* leżąca poza zasięgiem naszego doświadczenia jest zasadniczo niedostępna. Ten rodzaj subiektywizmu równie dobrze stosuje się do mechaniki klasycznej, w której kodyfikujemy nasze doświadczenie w równaniach odzwierciedlających zachowanie obiektów klasycznych w kategoriach takich pojęć jak masa, prędkość, pęd i przyspieszenie[139]. Prawdopodobnie jesteśmy zmuszeni uznać ten subiektywizm tylko w odniesieniu do mechaniki kwantowej, gdyż tutaj wreszcie stajemy w obliczu dziwacznych konsekwencji przyjęcia perspektywy realistycznej.

Jednak Fuchs dowodzi, że QBism nie ma charakteru poglądów instrumentalistycznych. Zainspirowany wieloma argumentami Johna Wheelera, woli myśleć o tej interpretacji jako uwzględniającej swego rodzaju „realizm partycypacyjny" (więcej na ten temat w dalszej części książki). Nie chodzi tutaj o uczestnictwo w sensie ludzkiej percepcji i doświadczenia, niezbędnych, by wyczarować coś z niczego i „uczynić to realnym", z czym mogłoby się wiązać odrzucenie Pierwszego i Drugiego Sądu Logicznego. Zamiast tego QBism twierdzi po prostu, że w mechanice kwantowej nie możemy dłużej ignorować faktu, iż jesteśmy mocno wrośnięci w rzeczywistość, którą tak usilnie staramy się opisać:

> QBism wdarł się na terytorium, na jakie znakomita większość tych, którzy deklarują, że mają naukowy światopogląd, bałaby się wkroczyć. Chodzi o to, że agenci (obserwatorzy) mają takie samo znaczenie dla konstrukcji rzeczywistego świata jak elektrony i atomy – posługujący się teorią kwantową agenci nie są dla niej obojętni[140].

Aksjomatyczna rekonstrukcja Hardy'ego, spójne historie i QBism wymagają pewnego znaczącego kompromisu. Owszem, wszystkie problemy znikają i możemy o nich zapomnieć. Jednak pozostaje nam tylko rozważanie rzeczywistości zbudowanej z prawdopodobieństw i niczego więcej albo odrzucenie jednej jedynej wersji prawdy historycznej, albo rzeczywistość, która jest nieodłącznie subiektywna i partycypacyjna. Jest oczywiste, że żadne z tych podejść nie może

podsunąć nam jakichkolwiek nowych spostrzeżeń ani pomóc zrozumieć leżącej u podstaw fizyki. W kontekście Czwartego Sądu Logicznego są to rekonstrukcje lub interpretacje pasywne, a nie aktywne.

Wydaje się, że nawet jeśli nie tkwimy już w pułapce Scylli, bezlitośnie narażeni na działanie jej potwornego czaru, to nie zdołaliśmy odpłynąć statkiem zbyt daleko.

121 Lucien Hardy, *Quantum Theory from Five Reasonable Axioms*, arXiv:quant-ph/0101012v4, 25 września 2001 roku.

122 Po dalszym zastanowieniu Hardy zrozumiał, że może porzucić żądanie ciągłości transformacji. Założenie odwracalności w połączeniu z jego trzecim aksjomatem w zupełności wystarcza, by zapewnić tę ciągłość.

123 Giulio Chiribella, cyt. za: Philip Ball, *Quantum Theory Rebuilt from Simple Physical Principles*, „Quanta", 30 sierpnia 2017 roku.

124 Karl R. Popper, *Quantum Theory*…, op. cit., s. 72.

125 Wspomniana „przestrzeń" to abstrakcyjna przestrzeń matematyczna zwana *przestrzenią Hilberta* na cześć Davida Hilberta.

126 Robert Griffiths, kontakt osobisty, 5 listopada 2018 roku.

127 Robert B. Griffiths, *Consistent Quantum Theory*, Cambridge University Press, Cambridge 2002, s. 214.

128 Robert B. Griffiths, *The Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics*, „Stanford Encyclopedia of Philosophy", wiosna 2017, s. 3.

129 Fay Dowker i Adrian Kent, *On the Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics*, „Journal of Statistical Physics" 1996, nr 82, s. 1575–1646. Zob. także arXiv:gr-qc/9412067v2, 25 stycznia 1996 roku.

130 Odpowiedź brzmi: „42".

131 Robert Griffiths, *The Consistent Histories Approach to Quantum Mechanics*, op. cit., s. 46.

132 Na wypadek gdybyście czuli potrzebę powrotu do realistycznych sądów logicznych, ich poręczne zestawienie znajdziecie w dodatku.

133 Werner Heisenberg, *Fizyka a filozofia*…, op. cit. Kursywa moja.

134 Carlton M. Caves, Christopher A. Fuchs, Rüdiger Schack, *Quantum Probabilities as Bayesian Probabilities*, „Physical Review A" 2002, nr 65, 022305. Zob. także arXiv:quant-ph/0106133v2, 14 listopada 2001 roku.

135 Richard Healey, *Quantum-Bayesian and Pragmatist Views of Quantum Theory*, „Stanford Encyclopedia of Philosophy", wiosna 2017, s. 9.

136 N. David Mermin, *Annotated Interview with a QBist in the Making*, arXiv:quant-ph/1301.6551.v1, 28 stycznia 2013 roku. Jednak Mermin nieco inaczej interpretował skrót „QBism", widząc w nim raczej wyrazy uznania dla Bruna de

Finettiego, pioniera prawdopodobieństwa subiektywnego, niż dla Bayesa. „B” oznaczałoby więc „Bruno”.

137 Schack dowodził, że „pięć rozsądnych aksjomatów Hardy’ego można zredukować do czterech, dokonując ponownej interpretacji pierwszego w kategoriach prawdopodobieństw bayesowskich i modyfikując cześć dowodu”. Zob. Rüdiger Schack, *Quantum Theory from Four of Hardy’s Axioms*, „Foundations of Physics” 2003, nr 33, s. 1461–1468. Zob. także arXiv:quant-ph/0210017v1, 2 października 2002 roku.

138 Christopher A. Fuchs, N. David Mermin i Rüdiger Schack, *An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics*, „American Journal of Physics” 2014, nr 82, s. 749–754. Zob. także arXiv:quant-ph/1311.5253v1, 20 listopada 2013 roku.

139 Mermin mówi o CBismie (C od *classic* – klasyczny), klasycznym odpowiedniku QBismu. Zob. N. David Mermin, *Making Better Sense of Quantum Mechanics*, arXiv:quant-ph/1809.01639v1, 5 września 2018 roku.

140 Christopher A. Fuchs, *On Participatory Realism*, arXiv:quantph/ 1601.04360v3, 28 czerwca 2016 roku, s. 11.

ROZDZIAŁ 7

Mechanika kwantowa jest niekompletna

Trzeba więc coś dodać

Interpretacje statystyczne oparte na lokalnych i kryptonielokalnych zmiennych ukrytych

W rozdziałach 5 i 6 podsumowaliśmy interpretacje mechaniki kwantowej wynikające z dziedzictwa kopenhaskiego. Opierają się one na zbiorze metafizycznych prekoncepcji, które współgrają z antyrealizmem Bohra i (zwłaszcza) Heisenberga, bazujących na przesłance, iż mechanika kwantowa jest kompletna. W niedostępnym świecie kwantowym w końcu wpadliśmy na granicę rozdzielającą rzeczy same w sobie od rzeczy, jakimi się wydają, przed której istnieniem od stuleci ostrzegali nas filozofowie. Musimy pogodzić się z faktem, że dotarliśmy do kresu drogi i nie ma tu na co patrzeć.

Jednak nie każdemu odpowiada taka antyrealistyczna perspektywa, czemu w 1981 roku aż nadto jasno dał wyraz teoretyk John Bell:

> Mając konieczność za zaletę i ulegając wpływowi filozofii pozytywistycznych i instrumentalistycznych, wielu doszło do przekonania, że nie tylko trudno jest znaleźć spójny obraz, ale wręcz błędem jest szukanie go [...] jeśli takie zachowanie nie jest niemoralne, to z pewnością jest nieprofesjonalne[141].

Gdy dokonując filozoficznego wyboru, staniemy po stronie Einsteina, Schrödingera oraz Poppera i zajmiemy bardziej

realistyczne stanowisko, oznacza to, że nie możemy się powstrzymać i musimy dać upust drzemiącemu w nas metafizykowi. Nie możemy się powstrzymać i oddajemy się spekulacjom na temat rzeczywistości leżącej głębiej, niż pokazują empiryczne dane, na temat rzeczywistości znajdującej się pod powłoką rzeczy, jakimi się wydają. Musimy przyznać, że mechanika kwantowa jest niekompletna, i przygotować się na częste wizyty na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej w nadziei, że uda się znaleźć coś – cokolwiek – co mogłoby pomóc nam ją dopełnić.

Czyniąc to, możemy zejść na manowce, ale mówiąc szczerze, wydaje mi się, że niepodjęcie *próby* byłoby sprzeczne z ludzką naturą.

Otwarcie drzwi do realizmu natychmiast sprawia, że z powrotem wpadamy w sam środek potwornego bałaganu. Każda realistyczna interpretacja, ponowne sformułowanie lub rozszerzenie mechaniki kwantowej siłą rzeczy ciągnie za sobą wszystkie metafizyczne prekoncepcje na temat tego, jaka *powinna być* rzeczywistość. Musi odnieść się do wszystkich dziwacznych zjawisk, na które mechanika kwantowa zezwala, takich jak superpozycje obejmujące teraz rzeczywiste stany fizyczne (a nie zakodowaną informację), natychmiastowy kolaps funkcji falowej i wynikające z niego upiorne oddziaływanie na odległość. Musi objaśnić lub wyeliminować losowość i nieciągłość, będące nieodłącznymi cechami mechaniki kwantowej, musi przywrócić jakieś znaczenie ciągłości i związków przyczynowo-skutkowych, nad którymi władzę sprawuje Bóg nieobciążony skłonnością do hazardu. Musi znaleźć sposób na uczynienie świata kwantów spójnym ze światem klasycznym, tłumacząc go lub unikając arbitralnego „podejrzanego podziału" obu.

Od czego zaczniemy?

W swoim sporze z Bohrem oraz w korespondencji ze Schrödingerem Einstein napomknął o interpretacji *statystycznej*. W jego opinii kwantowe prawdopodobieństwa, uzyskiwane jako kwadrat funkcji falowej[142], odpowiadają w rzeczywistości prawdopodobieństwom statystycznym, wynikającym z uśrednienia dla dużej liczby fizycznie rzeczywistych cząstek. Odwołujemy się do prawdopodobieństw, ponieważ nic nie wiemy o własnościach

i zachowaniu fizycznie rzeczywistych obiektów kwantowych. To zupełnie inaczej niż w interpretacjach antyrealistycznych, które powołują się na prawdopodobieństwa na podstawie zdobytego w toku wcześniejszych prac doświadczenia, gdyż na temat fizyki zjawisk nie potrafimy powiedzieć nic sensownego.

Einstein bawił się takim podejściem w maju 1927 roku. Była to modyfikacja mechaniki kwantowej, łącząca klasyczne fale i opis korpuskularny, w której funkcja falowa odgrywała rolę „pola prowadzącego" (w języku niemieckim *Führungsfeld*), prowadząc lub „pilotując" fizycznie rzeczywiste cząstki. W schemacie tego rodzaju funkcja falowa jest odpowiedzialna za wszystkie efekty falowe, takie jak dyfrakcja i interferencja, cząstki jednak zachowują swoją integralność jako zlokalizowane, fizycznie rzeczywiste byty. Zamiast fal *lub* cząstek, czego żądała interpretacja kopenhaska, przygotowana przez Einsteina adaptacja mechaniki kwantowej była skonstruowana z fal *i* cząstek.

Einstein stracił jednak cały entuzjazm do tego nowego podejścia zaledwie w kilka tygodni od jego sformułowania. Nie wyszło to tak dobrze, aby spełniało pokładane w nim nadzieje. Okazało się, że funkcja falowa zyskuje o wiele większe znaczenie niż tylko statystyczne. Było ono niemal złowieszcze. Einstein sądził, że problem tkwił w tym, iż odległe cząstki wywierały na siebie wzajemnie pewien rodzaj dziwnej siły, co mu się bardzo nie podobało. Prawdziwym problemem było jednak to, że pole prowadzące jest zdolne wywierać upiorne, nielokalne oddziaływanie – zmiana zachodząca w jednym miejscu natychmiastowo wywołuje zmianę w innym miejscu, znacznie oddalonym od pierwszego. Artykuł na temat tego podejścia został przez Einsteina wycofany przed publikacją. Przetrwał tylko w postaci rękopisu w archiwum uczonego[143].

W rozdziale 8 powrócimy do tego rodzaju opisu za pomocą „fali pilotującej". Doświadczenie to prawdopodobnie skłoniło Einsteina do wniosku, że jego początkowe przekonanie – iż mechanikę kwantową da się dopełnić przez bardziej bezpośrednie połączenie pojęć fali i cząstki – było nierozważne. Wkrótce potem wyraził pogląd, iż kompletna teoria może pojawić się tylko w wyniku znacznie bardziej

radykalnej przebudowy całej struktury teoretycznej. Ostatecznie mechanika kwantowa miałaby zostać zastąpiona nieuchwytną wielką teorią unifikacji, na której poszukiwanie Einstein poświęcił w ostatnich dekadach życia większość intelektualnej energii.

Ta wczesna próba dopełnienia mechaniki kwantowej w wykonaniu Einsteina znana jest powszechnie jako *sformułowanie zmiennych ukrytych* albo po prostu „teoria zmiennych ukrytych". Opiera się na pomyśle, iż istnieje pewien aspekt fizyki rządzącej tym, co widzimy w eksperymencie, który jednak nie znajduje odbicia w opisie proponowanym przez teorię. Historia nauki zna, rzecz jasna, liczne precedensy podejścia takiego rodzaju. Jak już objaśniałem, Boltzmann sformułował statystyczną teorię termodynamiki opartą na „ukrytych" ruchach rzeczywistych atomów i cząsteczek. Podobnie w nieudanej próbie przerobienia mechaniki kwantowej podjętej przez Einsteina ukryte są położenia i ruchy rzeczywistych cząstek, prowadzonych przez funkcję falową.

Tymczasem w wydanej w 1932 roku książce *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* von Neumann przedstawił dowód, który mógł sugerować, że nie jest możliwe jakiekolwiek rozszerzenie mechaniki kwantowej oparte na zmiennych ukrytych[144]. Wydawało się, że to zamyka temat. Jeżeli zmienne ukryte mogą istnieć, to po co w ogóle zaprzątać sobie nimi głowę?

I rzeczywiście, na blisko dwadzieścia lat zapadło milczenie w tej sprawie. Dogmatyczny pogląd rodem z Kopenhagi zdominował myślenie, przesączył się do matematycznego formalizmu i stał się obowiązującą interpretacją, nieważne, czy wybierany przez fizyków kwantowych świadomie, czy nie. W społeczności fizyków przestano roztrząsać szczegóły i kontynuowano pracę, zadowalając się tym, że można zamknąć się i liczyć.

Milczenie przerwał David Bohm.

W lutym 1951 roku opublikował podręcznik, zatytułowany po prostu *Quantum Theory*, w którym poszedł po obowiązującej linii myślenia i odrzucił wyzwanie, jakim był „piorun z jasnego nieba" w postaci paradoksu EPR, mniej więcej tak, jak zrobił to Bohr. Jednak kiedy już pisał tę książkę, ogarnęły go złe przeczucia. Czuł, że coś tu jest mocno nie w porządku.

Einstein zaznajomił się z książką i wiosną 1951 roku zaprosił autora na spotkanie do Princeton. Wątpliwości na temat interpretacji teorii kwantowej, które zaczęły wślizgiwać się do umysłu Bohma, teraz skrystalizowały się w postaci jasno określonego problemu. „Spotkanie to wywarło wielki wpływ na wybór przeze mnie kierunku dalszych badań – napisał później Bohm – ponieważ poważnie zainteresowałem się kwestią odpowiedzi na pytanie, czy możliwe jest znalezienie deterministycznego rozszerzenia teorii kwantowej”[145]. Interpretacja kopenhaska przekształciła coś, co było tylko metodą obliczeń, w *objaśnienie* rzeczywistości, tymczasem Bohm był bardziej przywiązany do prekoncepcji przyczynowości i determinizmu, niż początkowo jemu samemu się wydawało.

W *Quantum Theory* Bohm stwierdził, że „żadna teoria mechanicznie określonych zmiennych ukrytych nie jest w stanie odtworzyć *wszystkich* wyników teorii kwantowej”[146]. Zdanie to okazało się prorocze. Bohm opracował pochodną wersję eksperymentu myślowego EPR, którą opublikował w serii kilku artykułów w 1952 roku, a później, w 1957 roku, rozwinął szerzej z Yakirem Aharonovem[147]. Pomysł opierał się na wykorzystaniu rozdzielenia dwuatomowych cząsteczek (takich jak cząsteczka wodoru, H_2) na dwa atomy.

Otóż cząstki elementarne rozróżniane są nie tylko na podstawie ich własności związanych z ładunkiem elektrycznym i masą, lecz także dzięki kolejnej własności, którą nazywamy *spinem*. Nazwa została dobrana dość niefortunnie [ang. *spin* oznacza *obrót*], a wzięła się stąd, że w latach dwudziestych XX wieku niektórzy fizycy podejrzewali, iż elektron zachowuje się niczym mała kulka naładowanej elektrycznie materii, wirując wokół własnej osi, jak robi to Ziemia w trakcie ruchu orbitalnego wokół Słońca. Nic takiego się nie dzieje, ale nazwa się utrwaliła.

Zjawisko kwantowe spinu jest tak naprawdę związane z wewnętrznym *momentem pędu* cząstki, który łączymy z ruchem obrotowym. Ponieważ elektron przenosi ładunek elektryczny, zachowuje się on jak malutki magnes. Nie należy jednak myśleć, iż dzieje się tak dlatego, że elektron naprawdę obraca się wokół

własnej osi. Jeśli zależałoby nam na trzymaniu się tej analogii, wówczas musimy zaakceptować fakt, że aby wrócić do pozycji wyjściowej, elektron musi obrócić się wokół własnej osi *dwukrotnie*[148]. Elektron ma tę własność dlatego, że jest cząstką materii należącą do *fermionów* (od nazwiska Enrica Fermiego). Charakteryzuje go spinowa liczba kwantowa 1/2 i dwa kierunki spinu – dwa kierunki, które może „wskazywać" w zewnętrznym polu magnetycznym malutki magnes elektronu. Określamy je jako spin „w górę" (↑) i spin „w dół" (↓). Brzmi znajomo?

Wiązanie chemiczne spajające atomy w dwuatomowej cząsteczce powstaje w wyniku nałożenia „orbit" elektronów obu atomów i połączenia ich w parę w taki sposób, że elektrony mają przeciwne spiny – ↑↓. Innymi słowy, dwa elektrony w wiązaniu chemicznym są splątane. Bohm i Aharonov wyobrazili sobie eksperyment, w którym wiązanie chemiczne zostaje zerwane w taki sposób, że kierunki spinu elektronów w obu atomach są zachowane (tak naprawdę zachowany jest całkowity moment pędu elektronów). W takim wypadku mielibyśmy dwa osobne atomy – nazwijmy je atom A i atom B – splątane w stanach spinu ↑ i ↓.

Bohm i Aharonov przenieśli eksperyment EPR z niedostępnych wyżyn czystej myśli do praktycznego świata laboratorium fizycznego. Właściwie konkluzją napisanego przez nich w 1957 roku artykułu było stwierdzenie, że eksperymenty umożliwiające pomiar korelacji pomiędzy odległymi, splątanymi cząstkami zostały już przeprowadzone. Dla tych fizyków, którzy uważnie śledzili rozwój wydarzeń, stwierdzenie Bohma i wzmianka o praktycznym teście były równoważne z pojawieniem się oszałamiających możliwości.

Jednym z takich fizyków był John Bell. W 1964 roku doznał olśnienia, które miało całkowicie odmienić kwestie związane z odwzorowaniem rzeczywistości na poziomie kwantowym. Po prześledzeniu i odrzuceniu dowodu von Neumanna jako błędnego i nieistotnego wyprowadził związek, który stał się znany jako *nierówność Bella*. „Prawdopodobnie równanie wpadło mi do głowy i przeniosłem je na papier w jeden weekend – wyjaśnił potem. – Intensywnie rozważałem te kwestie jednak wcześniej całymi

tygodniami. Przez wiele lat pytania te nieustannie tkwiły gdzieś z tyłu mojej głowy”[149].

Przypomnijmy sobie z rozdziału 4, że eksperyment EPR opierał się na kreacji par splątanych cząstek, A i B; teraz przyjmujemy, że są one atomami. Ponieważ całkowity moment pędu jest zachowany, wiemy, że atomy te muszą znajdować się w stanach charakteryzujących się przeciwnym spinem, jeden ma spin w górę, drugi spin w dół, co będziemy dalej zapisywać jako $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ i $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$. Zakładamy, że atomy A i B są osobnymi, „lokalnie rzeczywistymi” cząstkami, co oznacza, że kiedy oddalają się od siebie, zachowują osobną i niezależną tożsamość oraz własności kwantowe.

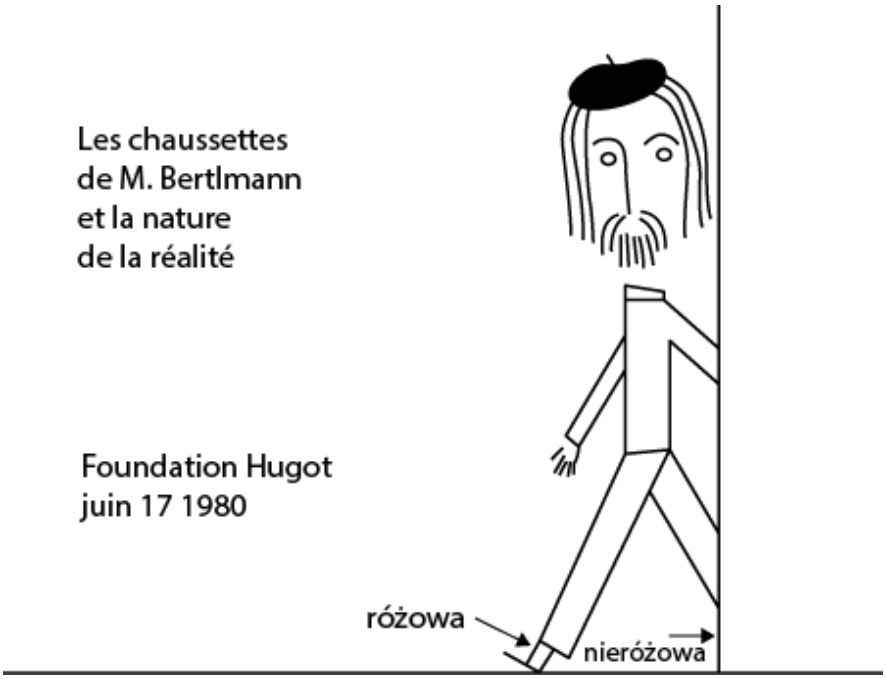
Załóżymy również, że wykonywanie jakiegokolwiek pomiaru na cząstce A w żaden sposób nie wpływa na własności i późniejsze zachowanie cząstki B. Dzięki takim założeniom kiedy dokonujemy pomiaru A i uzyskany wynik wskazuje, że cząstka znajduje się w stanie $\uparrow$, wówczas wiemy *na pewno*, że cząstka B musi znajdować się w stanie $\downarrow$. W mechanice kwantowej nie ma nic, co tłumaczyłoby, dlaczego tak się dzieje, teoria jest niekompletna i mamy wielki problem. Tak w skrócie rysuje się oryginalne wyzwanie stawiane przez eksperyment EPR.

Czy jednak jest to aż tak tajemnicze? Bell nieustannie wyszukiwał w codziennym życiu przykłady par obiektów, które są przestrzennie odseparowane, ale ich własności pozostają skorelowane, dzięki czemu mogłyby służyć jako dostępne odpowiedniki eksperymentu EPR. Znalazł doskonały przykład w stylu ubierania się jednego z kolegów w CERN, Reinholda Bertlmanna. Kilka lat później Bell napisał:

> Na ulicznym filozofie, który nie został ciężko doświadczony żadnym kursem mechaniki kwantowej, korelacje Einsteina–Podolskiego–Rosena nie robią żadnego wrażenia. Potrafi wskazać wiele przykładów podobnych korelacji z życia codziennego. Często przytaczany jest przypadek skarpetek Bertlmanna. Doktor Bertlmann lubi nakładać dwie skarpetki różnych kolorów. Nie da się przewidzieć, jaki kolor wybierze

danego dnia, kiedy jednak zobaczymy, że pierwsza skarpetka jest różowa, możemy mieć pewność, że druga różowa nie będzie. Obserwacja pierwszej skarpetki i znajomość nawyków Bertlmanna dają natychmiast informację o drugiej. Z gustami się nie dyskutuje, ale poza tym nie ma tu żadnej tajemnicy. Czyż cała ta historia EPR nie jest identyczna?[150]

Bell samodzielnie zilustrował opisaną sytuację, co pokazuje rysunek 12.



Rysunek 12. Skarpetki Bertlmanna a natura rzeczywistości

A może stany kwantowe atomów A i B zostały ustalone w wyniku działania jakiejś ukrytej zmiennej, w chwili gdy zostały uformowane i – zupełnie jak skarpetki Bertlmanna – atomy oddalają się od siebie w ustalonych z góry stanach? Wydaje się to całkowicie logiczne i w pełni zgodne z tym, co podpowiada nam intuicja. Nie można zaprzeczyć, że istnieje czynnik losowości, podobnie jak nie można zaprzeczyć, że Bertlmann może losowo wybrać, na którą nogę nałoży różową skarpetkę, lewą albo prawą, tak więc zmienna ukryta może losowo dawać wynik $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ albo $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$. Dopóki jednak spiny atomów

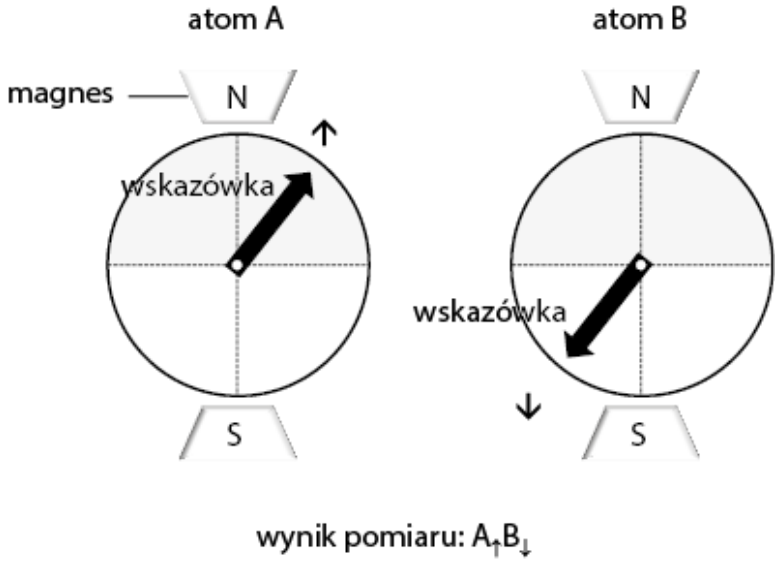
zawsze są przeciwne, dopóty wydaje się, że wszystko znakomicie spełnia prawa fizyki.

Jak miałoby to działać? Cóż, nie mamy sposobu, aby się dowiedzieć, jak wygląda zmienna ukryta lub jak działa, lecz oto znajdujemy się na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej, gdzie do woli możemy oddawać się spekulacjom. Załóżmy więc, że każdy atom ma jeszcze jedną własność, o której nic nie wiemy, która jednak według naszych założeń działa w ten sposób, że z góry określa spiny A i B w jakichkolwiek późniejszych pomiarach. Można wyobrazić sobie tę własność w postaci malutkiej wskazówki, schowanej w środku każdego atomu. Wskazówka ta może być zwrócona w dowolnym kierunku na sferze. Kiedy atomy A i B są formowane w wyniku przerwania wiązania w cząsteczce, pozycja ich wskazówek zostaje ustalona w procesie, który podlega zasadzie zachowania momentu pędu, wskazówki więc zawsze skierowane są przeciwnie.

Atomy oddalają się od siebie, wskazówki pozostają w ustalonym położeniu. Atom A, po lewej stronie, przechodzi pomiędzy biegunami magnesu, co pozwala wyznaczyć jego spin[151]. Atom B, po prawej stronie, przechodzi pomiędzy biegunami innego magnesu, który jest ustawiony w ten sam sposób co magnes po lewej. Wyniki pomiaru będziemy zapisywali w naprawdę prosty sposób. Jeżeli rzut na płaszczyznę wskazówki atomu A lub B skierowany jest w jakikolwiek punkt „północnego” półkola, zdefiniowanego w odniesieniu do bieguna północnego odpowiedniego magnesu (ukazanego na rysunku 13 jako zacieniony obszar), wówczas pomiar wskazuje, że atom znajduje się w stanie $\uparrow$. Jeżeli wskazówka skierowana jest ku „południowemu” półkolu (obszar niezacieniowany), to pomiar ujawnia, że atom znajduje się w stanie $\downarrow$. Rysunek 13 pokazuje, jak przykładowe (lecz losowe) ustawienie wskazówek prowadzi do wyniku pomiaru $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$.

W serii pomiarów na identycznie przygotowanych parach atomów spodziewamy się uzyskać losowy ciąg wyników: $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$, $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$, $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$, $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$, $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$, $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$ itd. Jeżeli przyjmiemy założenie, że każda para

rzutów wskazówek podlega losowemu, lecz jednorodnemu rozkładowi po całym kole, wówczas w statystycznie istotnej liczbie pomiarów zobaczymy, iż prawdopodobieństwo uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ wynosi 50 procent.



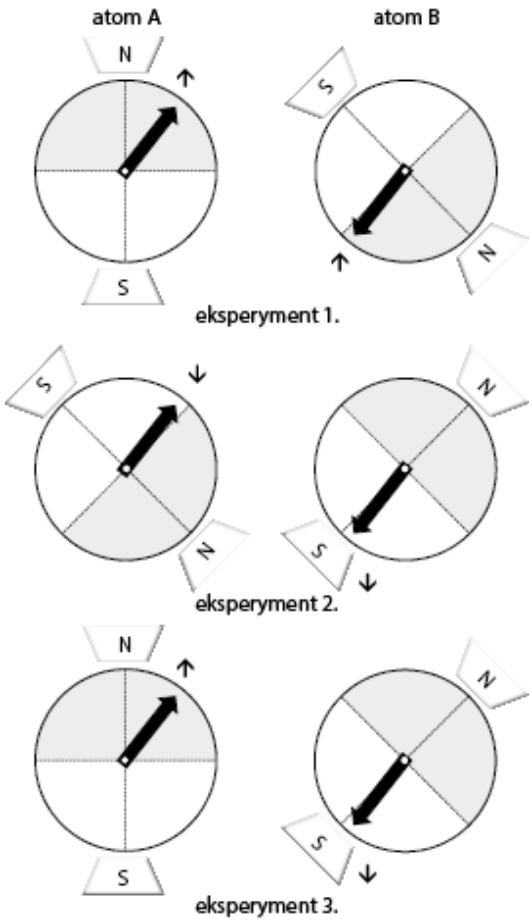
Rysunek 13. W prostym przypadku działania lokalnej zmiennej ukrytej na korelację pomiędzy spinami splątanych atomów wodoru zakładamy, że wyniki pomiaru są z góry określone przez „wskazówkę" schowaną w każdym atomie, której położenie zostaje ustalone w chwili uformowania atomów.

To właśnie tu Bell wprowadza zupełnie nowy poziom przebiegłości. Rysunek 13 pokazuje eksperyment, w którym magnesy są ustawione zgodnie – ich północne bieguny wskazują ten sam kierunek. Co się stanie, gdy teraz zaczniemy *obracać* jeden z magnesów względem drugiego? Pamiętajmy, że „północne" i „południowe" półkole zdefiniowane jest w odniesieniu do ustawienia biegunów magnesu. Wobec tego jeżeli magnes się obraca, robią to też półkola. Oczywiście, nadal zakładamy, że wskazówki zmiennej ukrytej mają ustalone położenie w przestrzeni w chwili, gdy atomy są formowane – ich kierunek jest ponoć określony przez fizykę atomową i nie ma nań wpływu to, jakie ustawienie magnesów moglibyśmy *wybrać* w laboratorium. Atomy miały być przecież lokalnie rzeczywiste.

Załóżmy, że przeprowadzamy serię trzech eksperymentów:

	Ustawienie magnesu dla atomu A	Ustawienie magnesu dla atomu B	Różnica kąta ustawienia magnesów
Eksperyment 1.	0°	135°	135°
Eksperyment 2.	135°	45°	90°
Eksperyment 3.	0°	45°	45°

Rysunek 14 pokazuje, jak obracanie zgodnie z ruchem wskazówek zegara jednego magnesu względem drugiego wpływa na wyniki pomiarów dla tego samego ustawienia wskazówek, jakie pokazano na rysunku 13. W eksperymencie pierwszym obrócenie magnesu dla atomu B o kąt 135° oznacza, że wskazówka atomu B teraz odpowiada stanowi ↑, dając wynik $A_{\uparrow}B_{\uparrow}$. Nie znaczy to, że złamaliśmy jakąkolwiek zasadę zachowania – wskazówki zmiennej ukrytej dla A i B nadal skierowane są przeciwnie. Znaczy to tylko, że otworzyliśmy nasz eksperyment na szerszy zakres możliwych wyników: obracanie magnesu dla atomu B skutkuje tym, że dopuszczalne są teraz oba wcześniej wykluczane rezultaty: $A_{\uparrow}B_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}B_{\downarrow}$. Ponieważ prawdopodobieństwa wszystkich wyników wciąż muszą sumować się do 100 procent, wyraźnie widzimy, że prawdopodobieństwo wyników $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ i $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$ musi być mniejsze.

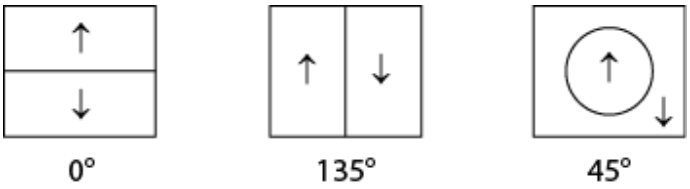


Rysunek 14. Dokonując obrotu magnesów względem siebie, Bell wprowadził do obmyślonej przez Bohma–Aharonova wersji eksperymentu Einsteina–Podolskiego–Rosena zupełnie nowy poziom przebiegłości.

Pytanie, jakie chcę zadać odnośnie do każdego z tych eksperymentów, brzmi następująco: jakie jest prawdopodobieństwo uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$? Zanim poszukamy odpowiedzi, proponuję na początek wprowadzić pewne związki liczbowe między prawdopodobieństwami dla tego wyniku w każdym eksperymencie. Nie mam zamiaru zagłębiać się w matematyczne szczegóły, toteż zrobię to z wykorzystaniem rysunków[152].

Wyobraźmy sobie, że rozrysowujemy poszczególne wyniki ↑ i ↓ – niezależnie od tego, którego atomu dotyczą, A lub B – dla każdego ustawienia magnesu. Dla ustawienia 0° dzielimy kwadrat na dwie połówki, górną i dolną. Dla 135° też dzielimy kwadrat na dwie połówki, ale tym razem lewą i prawą. Dla ustawienia 45° musimy

wykazać się większą wyobraźnią, mamy bowiem do dyspozycji tylko dwa wymiary, toteż narysujemy koło wewnątrz kwadratu w taki sposób, że pole koła jest równe powierzchni kwadratu pozostałej po wycięciu koła. Daje nam to:

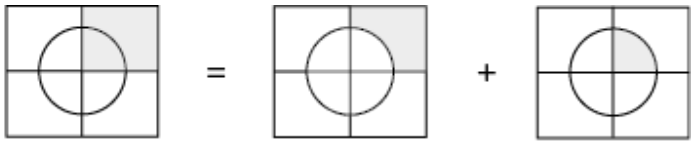


Możemy teraz połączyć te trzy schematyczne rysunki w jeden, co pozwoli nam nanieść wyniki $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ uzyskane we wszystkich eksperymentach. Na przykład w eksperymencie pierwszym wyniki, w których pomiary wykazały, że A znajduje się w stanie $\uparrow$ i B znajduje się w stanie $\downarrow$, zajmują górny prawy róg diagramu, zamalowany szarym kolorem. Analogicznie w eksperymentach drugim i trzecim uzyskujemy:

Powinniśmy jeszcze raz zauważyć, że wszystko to zadziała tylko wtedy, gdy przyjmiemy, iż atom A i atom B są całkowicie odrębnymi i rozłącznymi bytami, a dokonywanie pomiaru na jednym z nich w żaden sposób nie wpływa na pomiar drugiego. Musimy przyjąć, że atomy są lokalnie rzeczywiste.

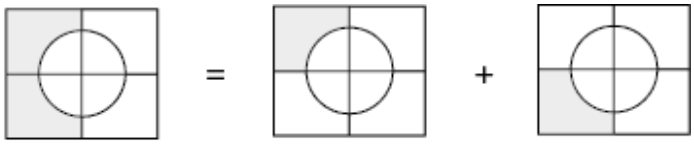
Jeśli to pomoże, można myśleć o szarych obszarach na diagramach jako miejscach, w których będziemy stawiali znak zatwierdzenia zawsze, gdy uzyskamy w każdym z eksperymentów wynik $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$. Każdy eksperyment przeprowadzamy na tej samej liczbie par atomów i zliczamy, ile razy postawiliśmy znak zatwierdzenia. Liczba tych znaków, podzielona przez całkowitą liczbę badanych par, daje nam *prawdopodobieństwo* uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ w każdym eksperymencie.

Właściwie to diagramy odpowiadają *zbiorom* liczb. Zabawmy się trochę nimi. Zbiór dla eksperymentu pierwszego możemy zapisać jako sumę dwóch mniejszych podzbiorów:



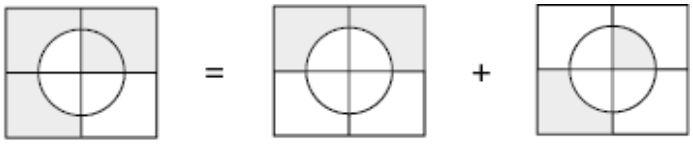
eksperyment 1.

Podobnie zbiór dla eksperymentu drugiego możemy zapisać jako:



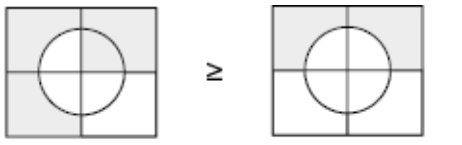
eksperyment 2.

Jeśli teraz dodamy do siebie te dwa równania stronami, uzyskamy:



eksperyment 1. + 2. eksperyment 3.

Nie możemy wykluczyć możliwości, że ostatni podzbiór w tym wyrażeniu nie będzie miał żadnych znaków zatwierdzenia, ale sądzę, że wszyscy się zgodzimy, iż całkowicie bezpiecznie mogę zapisać wniosek:



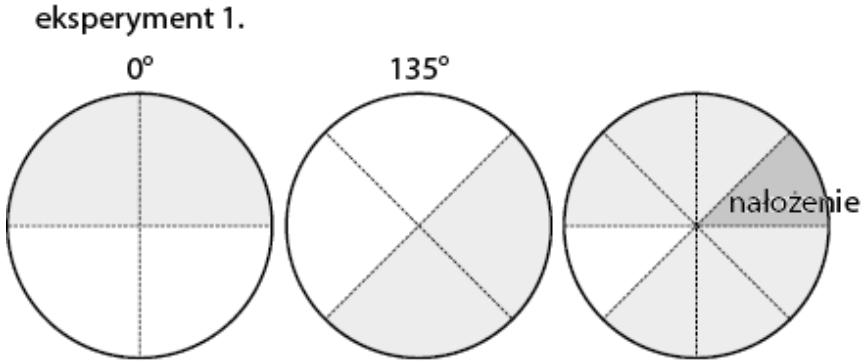
eksperyment 1. + 2. eksperyment 3.

gdzie symbol ≥ znaczy „większy lub równy”. Właśnie jest to nierówność Bella. W zasadzie nie ma nic wspólnego z mechaniką kwantową lub zmiennymi ukrytymi. Jest to po prostu logiczny wniosek uzyskany ze związków zachodzących pomiędzy niezależnymi zbiorami liczb. Jest też dość ogólny. Nie zależy od tego, jaki rodzaj teorii zmiennej ukrytej obmyślimy, dopóki jest ona lokalnie

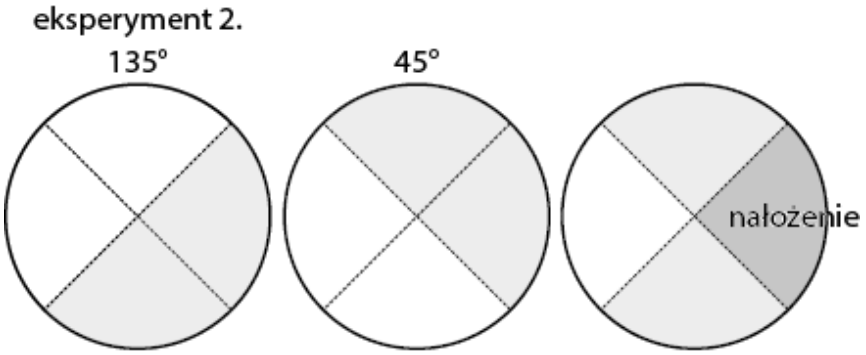
rzeczywista. Ogólność ta pozwoliła Bellowi sformułować twierdzenie „no-go": „Jeżeli rozszerzenie [bazujące na zmiennych ukrytych] jest lokalne, to nie będzie zgodne z mechaniką kwantową, a jeśli jest zgodne z mechaniką kwantową, to nie będzie lokalne"[153]. Uzupełnienie twierdzenia „no-go" zostało opracowane w 1967 roku przez Simona Kochena i Ernsta Speckera[154].

Nierówność Bella w takiej formie mówi, że suma prawdopodobieństwa uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ w eksperymencie pierwszym i prawdopodobieństwa uzyskania tego wyniku w eksperymencie drugim musi być większa – albo co najmniej równa – od prawdopodobieństwa uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ w eksperymencie trzecim.

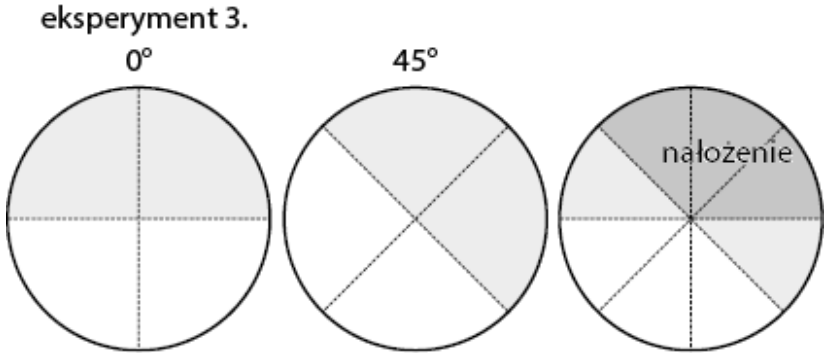
Możemy wydedukować te prawdopodobieństwa z naszej prostej, lokalnej teorii zmiennej ukrytej, badając wielkość obszaru, w którym nakładają się „północne" półkola dla dwóch magnesów w każdym eksperymencie, i dzieląc przez 360°. Z rysunku 13 wiemy, że pełne nałożenie równe 180° (magnesy są ustawione jednakowo) oznacza prawdopodobieństwo uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ równe 50 procent. W eksperymencie pierwszym obszar nałożenia zredukowany jest do 45°, prawdopodobieństwo uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ spada więc do 12,5 procent.



W eksperymencie drugim obszar nałożenia jest równy 90° (25 procent):



Natomiast w eksperymencie trzecim obszar nałożenia jest równy 135° (37,5 procent):



Poniższa tabela zawiera zbiorcze zestawienie wyników eksperymentów:

	Prawdopodobieństwo uzyskania A↑B↓ w lokalnej teorii zmiennych ukrytych	**Prawdopodobieństwo uzyskania A↑B↓ w mechanice kwantowej**
Eksperyment 1.	12½%	7,3%
Eksperyment 2.	25%	25%
Eksperyment 3.	37½%	42,7%

Jeżeli teraz dodamy do siebie prawdopodobieństwa w eksperymentach pierwszym i drugim, to według lokalnej teorii zmiennych ukrytych uzyskujemy sumę 37,5 procent, równą prawdopodobieństwu w eksperymencie trzecim, co jest w pełni zgodne z nierównością Bella.

Jakie są przewidywania mechaniki kwantowej (bez zmiennych ukrytych)? Nie chcę wdawać się w drobiazgowe rozważania. Zaufaj mi, kiedy powiem, że prawdopodobieństwo uzyskania wyniku $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ jest równe połowie kwadratu funkcji cosinus dla połowy kąta pomiędzy magnesami. Przewidywania mechaniki kwantowej znajdują się w prawej kolumnie powyższej tabeli. Jeśli podstawimy te wartości do nierówności Bella, dostajemy następującą zależność:

7,3% + 25% = 32,3% *musi być większe lub równe* 42,7%.

Odkryliśmy właśnie, że *mechanika kwantowa łamie nierówność Bella*. Przewiduje, że rozmiar korelacji zachodzących pomiędzy atomami A i B czasami może być większy, a czasami mniejszy niż wielkość korelacji dopuszczana przez *jakąkolwiek* lokalną teorię zmiennych ukrytych.

Jest to tak ważny wynik, że warto poświęcić trochę czasu na podsumowanie, aby upewnić się, iż rozumiemy, jak do tego doszliśmy. EPR szukali sposobu na obnażenie niekompletności mechaniki kwantowej w eksperymencie myślowym obejmującym pary splątanych cząstek. Jeśli przyjmiemy realistyczną interpretację funkcji falowej i założenie, iż cząstki są lokalnie rzeczywiste, a pomiar na jednej z nich nie ma żadnego wpływu na wynik pomiaru dokonywanego na drugiej, wówczas z pewnością czegoś brakuje. Bohm i Aharonov dokonali przeróbki tego eksperymentu i wykazali, w jaki sposób może on być podstawą praktycznego testu. Bell poszedł dalej, wprowadzając zupełnie nowy poziom przebiegłości, i uzyskał nierówność Bella.

Tu naprawdę mamy możliwość przeprowadzenia bezpośredniego testu: mechanika kwantowa kontra zmienne ukryte. Która droga jest właściwa? Czy nierówność Bella jest *w praktyce* łamana? To więcej niż dobry powód, aby wsiąść na pokład Statku Nauki i pożeglować ku Rzeczywistości Empirycznej.

Bell napisał swój artykuł w 1964 roku, jednak w wyniku pewnego nieporozumienia publikacja ukazała się dopiero w 1966 roku[155]. Musiało upłynąć mniej więcej dziesięć lat, aby w naukach empirycznych dokonał się postęp, dzięki któremu osiągnięto poziom wyrafinowania konieczny do rozpoczęcia poszukiwania ostatecznych odpowiedzi.

Choć eksperymenty tego typu kontynuowane są do dzisiaj, to chyba najsłynniejszy z nich został przeprowadzony i opisany na początku lat osiemdziesiątych XX wieku przez Alaina Aspecta i jego współpracowników na Uniwersytecie Paryskim. Nie wykorzystywano w nim splątanych atomów i magnesów. Posłużono się parami splątanych fotonów, wytwarzanych w „kaskadowej" emisji ze wzbudzonych atomów wapnia.

Podobnie do elektronów, fotony również charakteryzuje spin momentu pędu, ale zachodzi tu bardzo duża różnica. Fotony są „nośnikiem oddziaływań". Przenoszą oddziaływanie elektromagnetyczne i należą do bozonów (od nazwiska Satyendry Natha Bosego), dla których spinowa liczba kwantowa jest równa 1. Ponieważ fotony poruszają się z prędkością światła, istnieją tylko dwa kierunki spinu, które łączymy z lewoskrętną (☐) i prawoskrętną (☐) polaryzacją kołową światła, ocenianą z perspektywy *źródła* światła. Elektrony na najbardziej zewnętrznej powłoce atomu wapnia znajdują się na orbicie sferycznej, są połączone w pary ze względu na spin i mają zerowy moment pędu. Kiedy więc jeden z nich pochłania foton i zostaje wzbudzony na orbitę o wyższej energii, przejmuje kwantowy moment pędu fotonu. Spin elektronu nie może się zmienić, ponieważ ma ustaloną wartość. Przejęcie przekłada się na ruch orbitalny elektronu, wypychając elektron na orbitę o innym kształcie – z orbity sferycznej na orbitę w kształcie hantli (zob. rysunek 6c).

Jeżeli teraz wzbudzony atom wapnia trafimy *kolejnym* fotonem, możemy wzbudzić elektron, który został na orbicie sferycznej, i jego również wypchnąć na orbitę w kształcie hantli. Są tu możliwe trzy stany kwantowe, zależnie od tego, jak łączą się ze sobą spin i orbitalne momenty pędu elektronów. W jednym z tych stanów moment pędu się zeruje.

Choć stan ten jest bardzo niestabilny, atom wapnia nie może po prostu wyemitować fotonu i wrócić do sferycznej orbity o najniższej energii. Konieczne byłoby wykonanie przejścia bez zmiany momentu pędu, a po prostu nie ma fotonu, który by to zapewnił. Podejrzewam, że domyślacie się, dokąd to zmierza. Zamiast jednego atom emituje *dwa* fotony, błyskawicznie jeden po drugim. Jeden z tych fotonów ma długość fali odpowiadającą barwie zielonej (nazwiemy go fotonem A), drugi barwie niebieskiej (nazwiemy go fotonem B). Ponieważ nie może dojść do zmiany wartości momentu pędu fotonu, a całkowity moment pędu musi być zachowany, wyemitowane fotony *muszą* być charakteryzowane przez przeciwne stany polaryzacji kołowej.

Fotony są splątane kwantowo.

Użycie polaryzacji fotonów zamiast spinu elektronów lub atomów ma tę zaletę, że bez trudu możemy w laboratorium mierzyć polaryzację światła za pomocą analizatorów polaryzacji, takich jak choćby kryształy kalcytu[156]. Nie musimy wykorzystywać nieporęcznych magnesów.

Jedna drobnostka. Analizatory polaryzacji nie mierzą stanu polaryzacji kołowej fotonów. Mierzą polaryzację poziomą (↔) albo pionową (↕)[157]. Nie stwarza to jednak kłopotu. Foton o lewo- lub prawoskrętnej polaryzacji, padając na analizator polaryzacji liniowej ustawiony pionowo, ma 50 procent szans na przejście. Podobnie jest w przypadku analizatora ustawionego poziomo. Wiemy też już bardzo dobrze, że całkowitą funkcję falową, wyrażoną na bazie stanów polaryzacji lewo- i prawoskrętnej, można bez trudu zmienić, tak że bazę będą stanowić stany polaryzacji poziomej i pionowej.

Jak w przebiegłym eksperymencie Bella z magnesami, analizatory wykorzystywane do pomiaru stanu polaryzacji obu fotonów, A i B, zostały zamontowane na platformach, które można było obracać względem siebie. Eksperyment ze splątanymi fotonami jest w pełni równoważny doświadczeniu Bella.

Jeszcze jedna ważna uwaga. Detektory obu fotonów umieszczono w odległości 13 metrów, po przeciwnych stronach laboratorium. Jakikolwiek sygnał poruszający się z prędkością światła potrzebowałby

na pokonanie tego dystansu około 40 miliardowych sekundy. Tymczasem w eksperymencie badano pary fotonów A i B, których emisję dzieliło 20 miliardowych sekundy. Mówiąc inaczej, jeśli pomiędzy fotonami zachodziłoby jakiekolwiek upiorne oddziaływanie na odległość – pozwalające, aby pomiar jednego fotonu miał wpływ na pomiar drugiego – to musiałoby się rozchodzić z prędkością większą od prędkości światła.

Stoimy twardo na lądzie Rzeczywistości Empirycznej i musimy przyznać, że rzeczywisty świat potrafi być mało skory do współpracy. Analizatory polaryzacji „przeciekają", wobec czego ich dokładność nie sięga 100 procent. Nie wszystkie wyemitowane fotony da się „zebrać" i skierować do odpowiednich detektorów, a same detektory nie mają imponującej wydajności, rejestrują bowiem tylko ułamek fotonów, które rzeczywiście na nie padały. Zabłąkane fotony, które znalazłyby się w złym miejscu w złym czasie, mogłyby również zaburzyć zliczanie wykrytych par.

Niektóre z tych bardzo praktycznych niedostatków można kompensować przez rozszerzenie eksperymentu na czwarty zestaw analizatorów i zapisanie nierówności Bella w nieco inny sposób. W szczególności dla zestawu eksperymentalnego przygotowanego przez Aspecta i jego współpracowników nierówność Bella nakłada ograniczenie dla teorii zmiennych ukrytych, które wynosi 2 lub mniej. Mechanika kwantowa przewiduje maksymalną wartość na poziomie dwa razy pierwiastek kwadratowy z dwóch, czyli 2,828. Aspect i jego współpracownicy uzyskali wynik 2,697, z błędem ±0,015, co jasno wskazuje na łamanie nierówności Bella[158].

Wyniki te są naprawdę szokujące. Potwierdzają, że jeśli chcemy interpretować funkcję falową realistycznie, fotony w tajemniczy sposób pozostają ze sobą związane, dopóty dzieląc jedną i tę samą funkcję falową, dopóki na jednym z nich nie zostanie przeprowadzony pomiar. W tym momencie funkcja falowa ulega kolapsowi i fotony są „zlokalizowane" w stanach polaryzacji skorelowanych w stopniu, którego po prostu nie jest w stanie uwzględnić jakakolwiek lokalna teoria zmiennych ukrytych. Zdaje się, że pomiar polaryzacji fotonu A *rzeczywiście* wywiera wpływ na wynik, jaki uzyskamy dla fotonu B, i odwrotnie, nawet mimo faktu,

że fotony są tak daleko od siebie, iż jakikolwiek wymieniany przez nie sygnał musi rozchodzić się szybciej od światła.

Oczywiście, to był tylko początek. Dla fizyków, którzy są głęboko przekonani o słuszności swoich realistycznych poglądów, musiało zachodzić tu coś innego. Pojawiły się pytania. Może na zmienne ukryte ma jakiś wpływ to, jak przygotowany jest zestaw doświadczalny? Była to tylko pierwsza z wielu „luk", na które powoływano się w próbach udowodnienia, że wyniki uzyskane przez Aspecta niekoniecznie eliminują *wszystkie* lokalne teorie zmiennych ukrytych, jakie można sformułować.

Aspect przewidział, że ktoś może wytknąć tę pierwszą lukę, i wykonał dalsze eksperymenty z zamiarem jej zamknięcia. Zestaw doświadczalny zmodyfikowano, dołączając urządzenia, które mogły losowo przełączać tory fotonów, kierując każdy z nich do analizatorów ustawionych pod różnymi kątami. Tym samym wyeliminowano ewentualność, że fotony z góry „wiedziały", jakim torem będą podążać, a więc przez jaki analizator ostatecznie przejdą. Jest to równoważne ze zmianą względnego ustawienia dwóch analizatorów *w trakcie lotu fotonów*. Nie zmieniło to wyników. Nierówność Bella wciąż była łamana[159].

Problemu nie da się usunąć przez zwykłe zwiększenie odległości między źródłem splątanych cząstek a detektorami. Wykonano eksperymenty, w których detektory znajdowały się w Bellevue i Bernex, dwóch małych miejscowościach w Szwajcarii, niedaleko Genewy, które dzieli odległość niemal 11 kilometrów[160]. W późniejszych eksperymentach detektory umieszczono na La Palmie i Teneryfie, należących do Wysp Kanaryjskich, oddalonych o 144 kilometry. Nierówność Bella wciąż była łamana[161].

Dobrze, a jeśli zmienne ukryte są jakoś zależne od losowych wyborów dokonanych w trakcie przygotowywania eksperymentu, po prostu dlatego, że wybory te następują w tej samej skali czasu? W 2018 roku opisano eksperymenty, w których pomiar zależał od barwy fotonów wykrytych w świetle kwazarów, aktywnych jąder odległych galaktyk. Wobec tego losowy wybór warunków eksperymentu został dokonany niemal 8 miliardów lat *przed*

przeprowadzeniem pomiarów, tyle czasu bowiem zajęło fotonom dotarcie do Ziemi. Nierówność Bella wciąż była łamana[162].

Są inne luki, lecz te również zostały zamknięte przez eksperymenty przeprowadzane zarówno na splątanych fotonach, jak i splątanych jonach (atomach obdarzonych ładunkiem elektrycznym). Doświadczenia na splątanych *trypletach* fotonowych z 2000 roku wykluczyły wszelkie lokalnie realistyczne teorie zmiennych ukrytych bez odwoływania się do nierówności Bella[163].

Wydaje się więc, że jeśli chcemy przyjąć realistyczną interpretację, musimy zaakceptować fakt, że ta rzeczywistość jest *nielokalna* albo przynajmniej łamie *lokalną przyczynowość*.

Czy jednak nadal możemy pójść na jakiś kompromis, aby dotrzeć do rzeczywistości? W tych eksperymentach przyjmowaliśmy założenie, iż własnościami splątanych cząstek rządzi jakiś, zapewne bardzo złożony zbiór zmiennych ukrytych. Mają one unikatowe wartości, które z góry określają stany kwantowe cząstek oraz ich późniejsze oddziaływanie z przyrządami pomiarowymi. Poczyniliśmy też założenie, że cząstki formują się ze statystycznym rozkładem tych zmiennych, który to rozkład określany jest tylko przez fizykę, a nie przez sposób, w jaki przygotowujemy eksperyment.

Lokalne teorie zmiennych ukrytych charakteryzowane są przez dwa dalsze założenia. W pierwszym z nich twierdzimy (jak zrobili to EPR), że *wynik* pomiaru przeprowadzanego na cząstce A w żaden sposób nie wpływa na wynik pomiaru dokonywanego na cząstce B i odwrotnie. W drugim stwierdzamy, że *ustawienie* urządzenia używanego przez nas do wykonania pomiaru na cząstce A w żaden sposób nie wpływa na wynik pomiaru na cząstce B i odwrotnie.

Eksperymentalne łamanie nierówności Bella pokazuje, że jedno z tych założeń (albo obydwa) jest błędne. Oczywiście, eksperymenty nie ujawniają jednak, która ewentualność zachodzi.

W artykule z 2003 roku laureat Nagrody Nobla Anthony Leggett zdecydował się porzucić założenie dotyczące ustawienia. Przyznał tym samym, że na zachowanie cząstek i wyniki kolejnych pomiarów *ma wpływ* to, jak ustawione są urządzenia pomiarowe. Wszystko to wciąż jest bardzo upiorne i mocno sprzeczne z intuicją:

> nic w zdobytym przez nas doświadczeniu naukowców zajmujących się fizyką nie wskazuje na to, że ustawienie odległych [urządzeń pomiarowych] wpływa na wynik eksperymentu w większy lub mniejszy sposób niż, powiedzmy, ułożenie kluczy w kieszeni eksperymentatora lub czas wskazywany przez zawieszony na ścianie zegar[164].

Zachowując założenie dotyczące wyniku, definiujemy klasę nielokalnych teorii zmiennych ukrytych, w których pojedyncze cząstki mają ściśle określone własności przed aktem pomiaru. To, co rzeczywiście zostanie zmierzone, będzie oczywiście zależało od ustawień, toteż zmiana tych ustawień będzie jakoś wpływać na zachowanie odległych cząstek (stąd przymiotnik „nielokalne"). Leggett określał tę szeroką klasę teorii mianem „kryptonielokalnych" teorii zmiennych ukrytych. Są one efektem swego rodzaju kompromisu między teoriami ściśle lokalnymi a całkowicie nielokalnymi.

Leggett wykazał też, że samo w sobie porzucenie założenia dotyczącego ustawienia jest wciąż niewystarczające, aby odtworzyć wszystkie wyniki mechaniki kwantowej. Podobnie jak zrobił to Bell w 1964 roku, Leggett wyprowadził nierówność, która jest spełniona dla wszystkich klas kryptonielokalnych teorii zmiennych ukrytych, ale przewidywał, że będzie łamana przez mechanikę kwantową. Stawką było rozstrzygnięcie raczej prostej kwestii, czy cząstki kwantowe mają przypisywane im przez nas własności *przed aktem pomiaru*. Mówiąc inaczej, nadarzała się sposobność, aby sprawdzić, czy jeszcze *przed* pomiarem cząstki kwantowe mają to, co moglibyśmy ewentualnie rozważać jako „rzeczywiste" własności.

Efekty eksperymentów zaprojektowanych w celu sprawdzenia nierówności Leggetta zostały ogłoszone publicznie w 2007 roku i ponownie odpowiedź nie jest jednoznaczna. Dla szczególnie dobranych ustawień w tych eksperymentach nierówność Leggetta żąda, aby wyniki były mniejsze od lub równe 3,779. Mechanika kwantowa przewiduje 3,879, złamanie nierówności o mniej niż 3 procent. Rezultat eksperymentu był równy 3,8521, z błędem na poziomie ±0,0227. Nierówność Leggetta była złamana[165].

W ostatnim czasie przeprowadzono kilka eksperymentów mających sprawdzić nierówność Leggetta, w wariantach różniących się od pierwowzoru. We wszystkich uzyskano potwierdzenie oryginalnego wyniku.

Wydawałoby się, że nie ma żadnego możliwego do odkrycia, wielkiego spisku natury, który miałby na celu zachowanie lokalności. W 2011 roku Mathew Pusey, Jonathan Barrett i Terry Rudolph z Imperial College w Londynie opublikowali nowe twierdzenie „no-go”[166]. W skrócie stwierdza ono, że jakikolwiek rodzaj rozszerzenia o zmienne ukryte, w którym funkcja falowa jest interpretowana czysto statystycznie, *nie może* odtworzyć wszystkich przewidywań mechaniki kwantowej.

„Twierdzenie PBR”, jak jest nazywane, w chwili publikacji wywołało niemałe zamieszanie i ostry spór[167]. Oceniono, że wyklucza ono wszelkiego rodzaju interpretacje, w których funkcja falowa odpowiada „wiedzy”, a faworyzuje te, w których funkcja falowa jest uważana za realny byt. Tylko że przez pojęcie „wiedzy” rozumiemy tutaj wiedzę pochodzącą ze *statystyki* czegokolwiek, co, jak zakładamy, leży u podstaw zjawisk fizycznych i co dalej przyjmujemy jako obiektywną rzeczywistość. Podczas gdy twierdzenie faworyzuje realistyczne interpretacje, które nie są oparte na statystyce, nie wyklucza antyrealistycznych interpretacji w rodzaju tych, które rozważaliśmy w rozdziałach 5 i 6.

Powinniśmy mimochodem zauważyć, że podczas gdy wszystkie lokalne lub kryptonielokalne teorie zmiennych ukrytych zostały wykluczone przez te eksperymenty, to właśnie dzięki nim doskonale widać, jak realistyczne interpretacje dostarczyły eksperymentatorom przekonujących powodów do tego, aby zakasać rękawy i wziąć się do pracy. W tym przypadku poszukiwanie teoretycznych pomysłów i rozumienia, w duchu Czwartego Sądu Logicznego (zob. dodatek), było bodźcem do opracowania pewnych autentycznie fantastycznych innowacji w dziedzinie badań eksperymentalnych. Choć poszukiwania sensownych odpowiedzi do tej pory okazały się bezowocne, to częściowo właśnie wysiłki nakierowane na rozwiązanie tych fundamentalnych kwestii i zbadanie osobliwego zjawiska splątania kwantowego przyczyniły się do rozwoju stosunkowo nowych dziedzin

nauki, takich jak informatyka kwantowa, kryptografia kwantowa czy prace nad komputerami kwantowymi.

Musimy teraz stawić czoło wnioskom ze wszystkich eksperymentalnych testów nierówności Bella i Leggetta. W jakiejkolwiek realistycznej interpretacji, w której przyjmujemy, że funkcja falowa stanowi odzwierciedlenie rzeczywistego stanu fizycznego układu kwantowego, *funkcja falowa musi być nielokalna lub musi łamać lokalną przyczynowość*.

Doskonale, sprawdźmy więc, co to znaczy.

141 John Bell, „Journal de Physique” Colloque C2, Supplement 3, 1981, nr 42, s. 41–61. Przedruk w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1987, s. 139–158. Cytat pojawia się na s. 142.

142 Tak naprawdę, modułu... Dobrze, dobrze. Już o tym mówiliśmy, więc ani słowa więcej.

143 Darrin W. Belousek, *Einstein's 1927 Unpublished Hidden-Variable Theory: Its Background, Context and Significance*, „Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics” 1996, nr 27, s. 437–461. Peter Holland przygląda się bliżej motywom Einsteina, kryjącym się za odrzuceniem tego podejścia, w artykule *What's Wrong with Einstein's 1927 Hidden-Variable Interpretation of Quantum Mechanics*, „Foundations of Physics” 2005, nr 35, s. 177–196, arXiv:quantph/0401017v1, 5 stycznia 2004 roku.

144 „Należy odnotować, iż nie ma potrzeby głębszego wnikania w mechanizm »ukrytych parametrów«, obecnie bowiem wiemy, że za ich pomocą nigdy nie da się wyprowadzić wyników uzyskanych przez mechanikę kwantową” (przekład angielski: John von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1955, s. 324).

145 Według Basila Hileya, wieloletniego współpracownika Bohma, o spotkaniu z Einsteinem Bohm miał się wyrazić następująco: „Po ukończeniu [*Quantum Theory*] miałem niezwykle silne wrażenie, że coś tu jest bardzo nie w porządku. W teorii kwantowej brakowało zadowalającego pojęcia jednostkowej rzeczywistości. Dyskusje z Einsteinem pozwoliły na wykrystalizowanie mojej opinii i zmobilizowały do dalszych poszukiwań” (wypowiedź cytowana przez Basila Hileya, osobiste kontakty autora, 1 czerwca 2009 roku).

146 David Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ 1951, s. 623.

147 David Bohm i Yakir Aharonov, *Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky*, „Physical Review” 1957, nr 108, s. 1070.

148 Pomyślmy o tym następująco. Weźmy kawałek szerokiej taśmy, skręćmy ją raz i połączmy brzegi, tak aby powstała ciągła i gładka powierzchnia. Otrzymaliśmy wstęgę Möbiusa, pierścień z taśmy, który ma tylko jedną „stronę” (nie można wyróżnić powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej). Teraz wyobraźmy sobie, że wybraliśmy się na spacer wzdłuż tej taśmy. Odkryjemy, że wracamy do punktu wyjścia, gdy obejdziemy pierścień dwukrotnie.

149 Cyt. za: P.C.W. Davies i Julian R. Brown (red.), *Duch w atomie: dyskusja o paradoksach teorii kwantowej*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo CiS, Warszawa 1996.

150 John Bell, *Bertlmann's Socks and the Nature of Reality*, „Journal de Physique" Colloque C2, Supplement 3, 1981, nr 42, s. 41–61. Przedruk w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*..., op. cit., s. 139–58. Cytat pojawia się na s. 139.

151 Urządzenie to jest znane jako aparat Sterna–Gerlacha, od nazwisk Otto Sterna i Waltera Gerlacha, którzy zademonstrowali ten efekt w 1922 roku na atomach srebra. Strumień atomów srebra, przechodzący pomiędzy biegunami magnesu, ulega rozszczepieniu na dwie połowy – tory jednej połowy atomów zakrzywiają się w kierunku bieguna północnego, tory drugiej połowy zakrzywiają się ku biegunowi południowemu – zgodnie z losowym rozkładem spinów najbardziej zewnętrznego elektronu w tych atomach, ↑ i ↓ (dla których szanse wystąpienia rozkładają się 50:50).

152 Ten obrazkowy opis pochodzi z artykułu Bernarda d'Espagnata, *The Quantum Theory and Reality*, „Scientific American" 1979, nr 241, s. 158–181. Zob. s. 162.

153 John Bell, *Locality in Quantum Mechanics: Reply to Critics*, „Epistemological Letters", listopad 1975, s. 2–6. Artykuł został przedrukowany w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*…, op. cit., s. 63–66. Cytat pojawia się na s. 65.

154 Simon Kochen i Ernst P. Specker, *The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics*, „Journal of Mathematics and Mechanics" 1967, nr 17, s. 59–87.

155 John S. Bell, *On the Problem of Hidden Variables in Quantum Theory*, „Reviews of Modern Physics" 1966, nr 38, s. 447–452. Artykuł został przedrukowany w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*…, op. cit., s. 1–13.

156 Kalcyt jest naturalną, dwójłomną postacią węglanu wapnia. Ma strukturę krystaliczną, którą charakteryzują dwa różne współczynniki załamania, związane z dwiema różnymi płaszczyznami. Na jednej z tych płaszczyzn leży oś optyczna maksymalnej przepuszczalności światła spolaryzowanego pionowo, na drugiej oś optyczna maksymalnej przepuszczalności światła spolaryzowanego poziomo. Wobec tego przejście światła przez kryształ prowadzi do fizycznego rozdzielenia pionowych i poziomych składowych, umożliwiając pomiar natężenia każdej z nich z osobna. Po starannej obróbce kryształ kalcytu może przepuszczać praktycznie całość padającego nań światła.

157 Okulary przeciwsłoneczne Polaroid ograniczają blask, gdyż nie przepuszczają światła spolaryzowanego poziomo.

158 Alain Aspect, Philippe Grangier i Gérard Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem*, „Physical Review Letters" 1981, nr 47, s. 460–463; Alain Aspect, Philippe Grangier i Gérard Roger, *Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm* Gedankenexperiment*: A New Violation of Bell's Inequalities*, „Physical Review Letters" 1982, nr 49, s. 91–94.

159 Alain Aspect, Jean Dalibard i Gérard Roger, *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers*, „Physical Review Letters" 1982, nr 49, s. 1804–1807.

160 Wolfgang Tittel, Jürgen Brendel, Nicolas Gisin i Hugo Zbinden, *Long-Distance Bell-Type Tests Using Energy-Time Entangled Photons*, „Physical Review A" 1999, nr 59, s. 4150–4163.

161 Thomas Scheidl, Rupert Ursin, Johannes Kofler, Sven Ramelow, Xiao-Song Ma, Thomas Herbst, Lothar Ratschbacher, Alessandro Fedrizzi, Nathan K. Langford, Thomas Jennewein i Anton Zeilinger, *Violation of Local Realism with Freedom of Choice*, „Proceedings of the National Academy of Sciences" 2010, nr 107, s. 19708–19713.

162 Dominik Rauch, Johannes Handsteiner, Armin Hochrainer, Jason Gallicchio, Andrew S. Friedman, Calvin Leung, Bo Liu, Lukas Bulla, Sebastian Ecker, Fabian Steinlechner, Rupert Ursin, Beili Hu, David Leon, Chris Benn, Adriano Ghedina, Massimo Cecconi, Alan H. Guth, David I. Kaiser, Thomas Scheidl i Anton Zeilinger, *Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars*, „Physical Review Letters" 2018, nr 121, 080403.

163 Jian-Wei Pan, Dik Bouwmeester, Matthew Daniell, Harald Weinfurter i Anton Zeilinger, *Experimental Test of Quantum Nonlocality in Three-Photon Greenburger-Horne-Zeilinger Entanglement*, „Nature" 2000, nr 403, s. 515–519.

164 Anthony J. Leggett, *Nonlocal Hidden-Variable Theories and Quantum Mechanics: An Incompatibility Theorem*, „Foundations of Physics" 2003, nr 33, s. 1469–1493. Cytat pojawia się na s. 1474–1475.

165 Simon Gröblacher, Tomasz Paterek, Rainer Kaltenbaek, Caslav Brukner, Marek Zukowski, Markus Aspelmeyer i Anton Zeilinger, *An Experimental Test of Non-local Realism*, „Nature" 2007, nr 446, s. 871–875. Gdybyście byli ciekawi, w eksperymentach tych nierówność Bella również jest złamana.

166 Matthew F. Pusey, Jonathan Barrett i Terry Rudolph, *On the Reality of the Quantum State*, „Nature Physics" 2012, nr 8, s. 475–478.

167 Znakomite omówienie tego zagadnienia można znaleźć w: Matthew Saul Leifer, *Is the Quantum State Real? An Extended Overview of ψ-ontology Theorems*, „Quanta” 2014, nr 3, s. 67–155.

ROZDZIAŁ 8

Mechanika kwantowa jest niekompletna

Musimy więc dodać do niej coś jeszcze innego

Fale pilotujące, potencjały kwantowe i fizyczne mechanizmy kolapsu

Einstein nie był jedynym, który szukał sposobu na ponowne wprowadzenie przyczynowości i determinizmu do realistycznej interpretacji mechaniki kwantowej. Tego samego poszukiwał de Broglie, który podczas piątego kongresu Solvaya w Brukseli w 1927 roku przedstawił teorię będącą jego własnym „dwoistym rozwiązaniem", uwzględniającą jednocześnie fale pilotujące i „fale prawdopodobieństwa". Jeśli jednak liczył na wsparcie Einsteina podczas kongresu, to spotkało go rozczarowanie. Poza zasugerowaniem, że poszukiwania de Broglie'a zmierzają we właściwym kierunku, Einstein pozostał niewzruszony.

Teoria de Broglie'a szybko wyewoluowała w lepiej znaną teorię fali pilotującej, w której funkcja falowa wytycza tory ruchu cząstkom realnym fizycznie. Jednak dalsze dyskusje (w szczególności z Paulim) zasiały w nim ziarno wątpliwości, czy jego teoria jest poprawna, i na początku 1928 roku de Broglie całkiem porzucił ten pomysł. Nie włączył swojej teorii do kursu mechaniki falowej, który prowadził później tego samego roku w Faculté des Sciences w Paryżu.

W istocie de Broglie nawrócił się na ortodoksyjną interpretację kopenhaską.

Spotkanie z Einsteinem w 1951 roku zachęciło Bohma do ponownego przyjrzenia się teorii kwantowej i głębszego zastanowienia. Jak wyjaśniłem w rozdziale 4, interpretacja kopenhaska jest formalnie zakorzeniona w standardowym formalizmie kwantowym przez strukturę swoich aksjomatów, szczególnie Aksjomatu Pierwszego (dla przypomnienia zob. dodatek). Zamiast przyjąć to za pewnik, Bohm postanowił zbadać *możliwość*, że *zasadniczo* dopuszczalne są inne opisy, a więc również inne interpretacje.

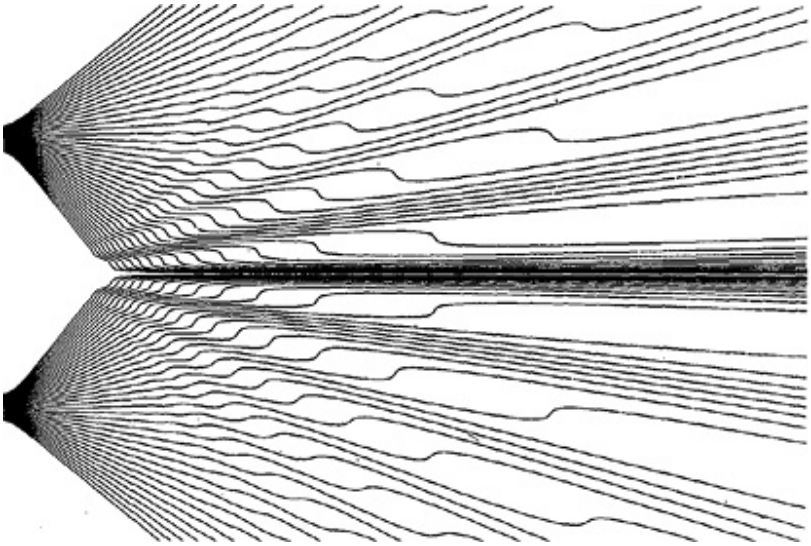
Zaczął od przerobienia równania falowego Schrödingera, zakładając istnienie realnej cząstki podążającej w przestrzeni realną trajektorią, której ruch związany jest z falą przez nałożenie „warunku prowadnicowego" (określa on jej prędkość). Oznacza to, że ruchem cząstki rządzi klasyczna energia potencjalna układu – nachylenie stoku w mojej wcześniejszej analogii do Syzyfa – *oraz* tak zwany *potencjał kwantowy*. Ten ostatni, o charakterze zdecydowanie nieklasycznym i nielokalnym, jest jedynym odpowiedzialnym za wprowadzenie efektów kwantowych do opisu, który w innym wypadku byłby całkowicie klasyczny.

Wkrótce potem Bohm zorientował się, że dokonał powtórnego odkrycia teorii fali pilotującej de Broglie'a, i to podejście znane jest dzisiaj pod różnymi nazwami, albo jako teoria de Broglie'a–Bohma, albo jako mechanika Bohma. Z kolei zainteresowanie tą teorią doprowadziło Bella do wymyślenia jego twierdzenia i nierówności. Chciał wiedzieć, czy nielokalność jest nieunikniona w każdej interpretacji zmiennych ukrytych (i jest).

Zauważ, że w interpretacji de Broglie'a–Bohma sama funkcja falowa jest nieodłączną częścią opisywanej rzeczywistości, a nie jedynie sposobem na podsumowanie statystycznych zachowań wywodzących się z jakiejś leżącej u podstaw ukrytej rzeczywistości. W konsekwencji nie podlega twierdzeniu „no-go" autorstwa PBR. Jest w niej posmak statystyki, lecz nie w odniesieniu do funkcji falowej, tylko do (z założenia losowego) rozkładu położeń i prędkości początkowych prowadzonych przez nią realnych fizycznie cząstek. Te

warunki początkowe decydują, po jakich torach będą poruszały się cząstki. Rozkład statystyczny warunków początkowych prowadzi do rozkładu statystycznego po dostępnych trajektoriach.

Zainteresowanie Bohma teorią przygasło, ale odżyło w 1978 roku dzięki entuzjazmowi Basila Hileya, jego kolegi z Birkbeck College w Londynie, i pracy dwóch młodych badaczy, Chrisa Dewdneya i Chrisa Philippidisa. Czasem zobaczyć znaczy uwierzyć, kiedy więc Dewdney posłużył się teorią de Broglie'a–Bohma do obliczenia hipotetycznych trajektorii elektronów w doświadczeniu z dwiema szczelinami (zob. rysunek 15), powstały rysunek wywołał westchnienia zdumienia. Każdy elektron w tej symulacji przechodzi przez jedną z dwóch szczelin, podąża *jedną* z góry ustaloną trajektorią, prowadzony przez potencjał kwantowy, i zostaje wykryty jako jasna plamka na ekranie. Gdy przez aparat przechodzi więcej elektronów, różnorodność ich warunków początkowych oznacza, że poszczególne cząstki pokonują różne szczeliny i podążają różnymi trajektoriami. W efekcie na ekranie tworzy się wzór utworzony z plamek, który odzwierciedla zgrupowania różnych trajektorii – co interpretujemy jako powstający na dwóch szczelinach wzór interferencyjny.



Rysunek 15. Trajektorie cząstek w doświadczeniu z dwiema szczelinami przewidywane przez teorię de Broglie'a–Bohma

Możemy nabrać jakiegoś wyobrażenia o tym, jak to może działać, dzięki pewnym nowym i dość fascynującym eksperymentom. John Bush i jego koledzy z Instytutu Technologii w Massachusetts donieśli o doświadczeniu, w którym mała kropelka oleju odbija się od powierzchni cieczy[168]. Każde odbicie wytwarza w cieczy zbiór fal, które nakładają się na siebie i interferują, a powstały wzór interferencyjny steruje dalszym ruchem kropli. Gdy fale przechodzą przez dwa sąsiadujące ze sobą otwory w przeszkodzie, powstaje znany nam wzór interferencyjny dla dwóch szczelin (choć istnieją w tym względzie pewne wątpliwości)[169]. Następnie „wędrująca" kropla przechodzi przez jeden otwór lub drugi i prowadzona przez fale dociera do punktu przeznaczenia. Mimo że doświadczenie to jest całkowicie klasyczne, dowodzi się, iż opisane ruchy naśladują zachowania, które przewidywałaby teoria de Broglie'a–Bohma, gdyby kroplę oleju zastąpić realną cząstką kwantową.

Jednak takie klasyczne eksperymenty nie mogą imitować potencjału kwantowego, który, zgodnie ze swoją naturą, przejawia pewne bardzo dziwne zachowania. W celu zbadania tego powróćmy jeszcze raz do naszego ulubionego układu kwantowego składającego się z cząstek wprowadzonych w stan superpozycji stanów spinu $\uparrow$ i $\downarrow$. Przepuszczamy te cząstki, po jednej naraz, między biegunami magnesu. Zgodnie z teorią de Broglie'a–Bohma potencjał kwantowy w obecności pola magnetycznego zostaje rozszczepiony na dwie równe, lecz niepokrywające się części. Jedna z nich prowadzi cząstki do góry i cząstki, które podążą tym torem, dadzą wynik $\uparrow$. Druga prowadzi cząstki w dół, dając wynik $\downarrow$. Rezultat, który otrzymamy, zależy od warunków początkowych dla każdej cząstki, jeśli jednak cząstka podąży torem do góry, to potencjał kwantowy dla toru w dół nie znika. Zamiast tego utrzymuje się jako „pusta fala".

Musimy założyć, że cząstka podążająca między biegunami magnesu trajektorią prowadzącą w górę oddziałuje z jakimś rodzajem detektora. Mimo iż prawdopodobnie jest on urządzeniem o wymiarach klasycznych, kolejny raz przyznajemy, że jest zbudowany z obiektów kwantowych i pierwsze etapy interakcji

między cząstką a detektorem będą miały charakter kwantowy. Następnie dochodzi do dekoherencji, jednak nie w sensie wygodnego mechanizmu matematycznego, zaprojektowanego w celu wyeliminowania z preprawdopodobieństwa członów interferencyjnych, ale w sensie interpretacji dekoherentnych historii. W teorii de Broglie'a–Bohma potencjał kwantowy jest realną falą lub polem, zatem dekoherencja musi być realnym mechanizmem fizycznym. Później w tym rozdziale przyjrzymy się temu dokładniej.

W teorii de Broglie'a–Bohma funkcja falowa nie ulega kolapsowi fizycznemu w całej przestrzeni. „Puste fale" trwają nadal, lecz nie mają znaczenia dla pomiaru ani wynikającej z niego zmiany stanu naszej wiedzy o układzie. A nieodwracalny proces amplifikacji ze skali kwantowej do złożonej skali klasycznej oznacza, że wyniki pomiarów są ustalone na długo przedtem, zanim dojdziemy do skali kota Schrödingera.

Wszystko pięknie, tylko że tego rodzaju wyjaśnienia przyczynowe zwykle mają swoją cenę, tym razem związaną z rozprzestrzenianiem się pustych fal. Oczywiście, gdyby można było znaleźć dowody empiryczne na istnienie pustych fal, byłoby to ogromnym wsparciem dla teorii. Niestety, naszą wiedzę o funkcji falowej czerpiemy wyłącznie z pomiarów naprowadzanych przez nią *cząstek*, a puste fale, z definicji, nie są związane z żadnymi cząstkami – są puste.

Jeszcze jednak nie skończyliśmy. Powróćmy do doświadczenia EPR ze splątanymi atomami – A i B – znajdującymi się w przeciwnych stanach spinu, $\uparrow$ i $\downarrow$. Zasada zachowania momentu pędu wymaga, by spiny były ustawione równolegle, tak że w sytuacji gdy obydwa magnesy są zorientowane w tym samym kierunku (0^o – zob. rysunek 13), możliwymi wynikami pomiaru będą $A_{\uparrow}B_{\downarrow}$ i $A_{\downarrow}B_{\uparrow}$.

Załóżmy, że atom A porusza się z lewej strony i przechodzi między biegunami magnesu o orientacji 0^o. Rejestrujemy wynik $\uparrow$. Zgodnie z teorią de Broglie'a–Bohma ten akt pomiaru dokonany na atomie A natychmiast zmienia potencjał kwantowy i na atom B wpływa coś w rodzaju nielokalnego „momentu obrotowego". To działanie ustala

spin atomu B w taki sposób, że zostanie zarejestrowany stan ↓. Teoretyk Peter Holland pisze, że

> akt pomiaru przeprowadzanego na [A] polaryzuje [B] (w kierunku pola analizatora, które działa na [A]) i wyniki każdego następującego potem pomiaru na [B] będą zgodne z przewidywaniami mechaniki kwantowej[170].

Natychmiast zauważamy, że w tej interpretacji nielokalność naprawdę oznacza działanie na odległość: „od samego początku »upiorne działanie na odległość« jest w niej przyjmowane jako fakt. W ten sposób unika się jakiejkolwiek możliwości wejścia w konflikt z empiryczną zawartością mechaniki kwantowej”[171].

Patrzymy, jak głaz Syzyfa stacza się ze wzgórza. Dociera na dół, gdzie na jego ruch nie wpływa już nachylenie stoku (klasyczna energia potencjalna). Jeżeli nie ma żadnych przeszkód na drodze i możemy założyć, że nie ma tarcia, które by go hamowało, głaz będzie toczył się dnem doliny po linii prostej i ze stałą prędkością, zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki Newtona. Jednak zgodnie z teorią de Broglie’a–Bohma, chociaż dno doliny jest płaskie, to wcale nie oznacza, że znika tu potencjał kwantowy. Ruch kwantowego głazu nadal podlega pewnym bardzo upiornym, nielokalnym wpływom i pierwsza zasada Newtona traci swoje zastosowanie. Załóżmy, że jego splątany partner przechodzi przez urządzenie pomiarowe położone w następnej dolinie, wywołując fale w potencjale kwantowym. Wyobraźmy sobie pierwszy głaz, toczący się po dnie doliny, w który nagle, bez widocznej przyczyny uderza pewien niewidzialny kwantowy moment obrotowy, zmieniając jego prędkość i kierunek.

Teoria de Broglie’a–Bohma przywraca przyczynowość i determinizm. Eliminuje konieczność odwoływania się do kolapsu funkcji falowej, ale kosztem zaakceptowania nielokalnego, upiornego działania na odległość. Nie miejmy złudzeń, to z całą pewnością stoi w sprzeczności z duchem szczególnej teorii względności Einsteina, aczkolwiek obrońcy teorii twierdzą, że nie ma takiego eksperymentu spójnego z mechaniką kwantową, w którym zdołalibyśmy uzyskać

sugerowany przez nią transfer informacji z prędkością większą niż prędkość światła. Cząstki A i B rzeczywiście przesyłają sobie „sygnał" z dużej odległości, wpływając na siebie nawzajem za pośrednictwem potencjału kwantowego, ale nie możemy tego w żaden sposób wykorzystać. W tym sensie teoria de Broglie'a–Bohma i szczególna teoria względności Einsteina mogą ze sobą pokojowo – choć raczej niełatwo – współistnieć.

Nic dziwnego, że Einstein nie był zachwycony podejściem Bohma. W liście do Borna pisze:

> Zauważyłeś, że Bohm wierzy (swoją drogą, podobnie jak de Broglie 25 lat temu), iż jest w stanie zinterpretować teorię kwantową w kategoriach deterministycznych? Ten sposób wydaje mi się zbyt tandetny[172].

Dzisiaj teoria de Broglie'a–Bohma zachowała niewielką, lecz oddaną grupę zwolenników rekrutujących się z kręgów zainteresowanych fizyków i filozofów, jednak pozostaje poza głównym nurtem fizyki kwantowej i figuruje w niewielu podręcznikach na jej temat. Jest pod każdym względem równoważna mechanice kwantowej, niemniej dopuszcza całkiem odmienną interpretację zdarzeń zachodzących na poziomie kwantowym, która jest zdecydowanie lepiej dostrojona do naszych intuicyjnych metafizycznych prekoncepcji na temat funkcjonowania rzeczywistości.

Twierdzono, że przyczyna, dla której nauczamy formalizmu standardowej mechaniki kwantowej, a nie teorii de Broglie'a–Bohma, ma charakter historyczny[173]. Kto wie, co mogłoby się zdarzyć, gdyby w 1927 roku de Broglie nie dał się odwieść od swoich pomysłów, a wpływy ortodoksji kopenhaskiej nie byłyby tak silne? Czy standardową, domyślną interpretacją mogłaby się stać jakaś postać teorii fali pilotującej? Dla kogoś o idealistycznym spojrzeniu na to, jak dokonuje się postęp w nauce, to pogląd potencjalnie niepokojący. A to dlatego, że wybór między dwiema równoważnymi, rywalizującymi ze sobą interpretacjami jednej z najważniejszych fundamentalnych teorii fizycznych mógł być po prostu efektem

kolejności wystąpienia zdarzeń, a nie ważnych argumentów opartych na pojęciu prawdy i użyteczności w objaśnianiu świata.

Jak pisał Bell w 1982 roku:

> Dlaczego podręczniki ignorują wizję fali pilotującej? Czy nie powinna być nauczana? Może nie jako jedyna teoria, ale przynajmniej jako antidotum na powszechne samozadowolenie? Choćby po to, by pokazać, że wieloznaczność, subiektywność i indeterminizm nie są wymuszane przez fakty doświadczalne, ale stanowią rozmyślny wybór dokonywany przez teoretyków?[174]

Szczerze mówiąc, nie jestem tego taki pewien. Naukowcy przez wieki wyrobili sobie nawyk odzierania teorii z nieistotnych czy też niepotrzebnych elementów metafizycznych, jeśli mogli wykazać, że potrafią one doskonale funkcjonować bez nich. Za przykład niech posłużą epicykle Ptolemeusza, flogiston, eter czy cieplik, który kiedyś uważano za substancję odpowiedzialną za zjawisko ciepła. Nawet gdyby w 1927 roku jako preferowaną interpretację wybrano coś w rodzaju teorii de Broglie'a–Bohma, to podejrzewam, że jest ona zbyt kłopotliwa, by przetrwać w tej formie. Fizycy o podejściu praktycznym, którzy mniejszą wagę przykładają do przyczynowości i determinizmu oraz mniej obsesyjnie podchodzą do kwestii interpretacji i sensu, szybko zaczęliby się pozbywać zbędnych elementów teorii na rzecz zwiększenia wydajności obliczeń.

Jeżeli jesteśmy skłonni zgodzić się z Einsteinem i porzucić to podejście jako „zbyt tandetne", to musimy przyznać, że kończą nam się możliwości. Wiąże się z tym porzucenie *wszystkich* rodzajów teorii zmiennych ukrytych, czy to lokalnych, czy kryptonielokalnych, czy też czysto nielokalnych. Jeżeli nadal chcemy się upierać przy realistycznej interpretacji funkcji falowej, to musimy zaakceptować, że jesteśmy w kropce.

Nie mamy innego wyboru, jak tylko podjąć próbę skupienia się na *jednej* z najbardziej uporczywych zagadek mechaniki kwantowej i mieć nadzieję, że dodając do formalizmu kolejny fizyczny składnik, znajdziemy rozwiązanie przynajmniej tej jednej. Nawet skromny

sukces mógłby zapewnić nam wskazówki, jak rozwiązać niektóre z pozostałych.

Przyjrzyjmy się temu formalizmowi jeszcze raz i spróbujmy dostrzec w nim jakąś słabość, jakiś newralgiczny punkt. I znowu dość oczywistym elementem, który przykuwa naszą uwagę, jest proces pomiaru kwantowego, kolaps funkcji falowej i wynikający z niego „podejrzany podział" między światem klasycznym a kwantowym. W 1990 roku Bell opublikował artykuł, w którym doskonale streścił niepokój, jaki czujemy wobec wszelkich realistycznych interpretacji pomiaru kwantowego:

> Co dokładnie kwalifikuje pewne układy fizyczne do odgrywania roli układu „pomiarowego"? Czy funkcja falowa świata czekała z przeskokiem tysiące lat, póki nie pojawiło się pierwsze jednokomórkowe stworzenie? Czy może musiała czekać ciut dłużej, na jakiś bardziej kompetentny układ [...] w którego skład wchodziłby ktoś z tytułem doktora?[175]

Przyjrzyjmy się więc pomiarowi kwantowemu nieco dokładniej. Rozważmy układ kwantowy składający się z dużej liczby identycznych cząstek (na przykład fotonów lub elektronów). Fizycy nazywają taki zbiór *zespołem*. Wyobraź sobie, że wszystkie cząstki działają razem, „koncertowo", niczym zespół muzyków grających według jednej partytury.

Przygotowujemy cząstki w taki sposób, że wszystkim odpowiada jedna całkowita funkcja falowa, którą, tak jak poprzednio, możemy zapisać jako superpozycję stanów $\uparrow$ i $\downarrow$. Wszystkie cząstki nadal znajdują się w jednym stanie kwantowym: tak się po prostu złożyło, że ten stan jest superpozycją. Mówimy, że zespół znajduje się w *stanie czystym*. Przepuszczamy cząstki przez urządzenie pomiarowe i zachodzi losowy kolaps funkcji falowej w wiele wyników pomiaru. Możemy się spodziewać, że kiedy wszystkie cząstki przejdą przez urządzenie pomiarowe (zakładamy, że nie uległy w tym procesie zniszczeniu), otrzymamy mieszaninę 50:50 cząstek w indywidualnych stanach $\uparrow$ i $\downarrow$. *Pomiar przeniósł zespół ze stanu*

czystego w stan mieszany. Von Neumann wykazał, że tego rodzaju przekształcenie wiąże się ze wzrostem *entropii* układu.

Entropia jest wielkością termodynamiczną, którą interpretujemy dość prymitywnie jako miarę „nieporządku" w układzie. Na przykład bryła lodu, topiąc się, przekształca się w bardziej nieuporządkowaną postać ciekłą. Woda ogrzana do stanu wrzenia przekształca się w jeszcze bardziej nieuporządkowaną postać gazową. Wraz ze zmianą postaci od stałej przez ciekłą po gazową mierzona entropia wody rośnie.

Druga zasada termodynamiki mówi, że podczas zmiany następującej samorzutnie entropia zawsze rośnie. Jeżeli weźmiemy pod uwagę substancję – na przykład powietrze – zawartą w układzie zamkniętym, chronionym przed wymianą energii ze światem zewnętrznym, to entropia powietrza będzie spontanicznie i nieuchronnie rosła do wartości maksymalnej, gdy osiągnie ono stan równowagi. Jak podpowiada nam intuicja, wydaje się oczywiste, że składające się na powietrze molekuły tlenu i azotu oraz śladowe ilości atomów gazów szlachetnych nie skupią się wszystkie w jednym kącie pokoju, w którym piszę te słowa. Zamiast tego powietrze rozproszy się w całym pomieszczeniu, by zapewnić mniej więcej jednolite ciśnienie (dzięki Bogu). To stan o maksymalnej entropii.

Druga zasada termodynamiki wiąże entropię ze „strzałką czasu", wrażeniem, że chociaż możemy się swobodnie przemieszczać w trzech wymiarach przestrzennych – przód–tył, lewa–prawa, góra–dół – to w wymiarze czasowym zmuszeni jesteśmy poruszać się tylko w jedną stronę – do przodu. Załóżmy, że oglądamy film nakręcony podczas niedawnego przyjęcia. Obserwujemy, jak rozbity kieliszek koktajlowy samorzutnie składa się w całość, ponownie napełnia drinkiem Singapore sling i frunie z drewnianej podłogi, by powrócić do ręki gościa. Szybko doszlibyśmy do wniosku, że takie odwrócenie drugiej zasady termodynamiki sygnalizuje, iż film jest odtwarzany *wstecz* w czasie.

Wydawałoby się, że pomiar kwantowy, przekształcając stan czysty w mieszany, jest blisko związany z entropią, a więc z drugą zasadą termodynamiki. Stąd już tylko mały krok dzieli nas od strzałki czasu i pojęcia *nieodwracalności*. Tak jak nie spodziewamy się, że rozbity

kieliszek koktajlowy w najbliższym czasie samorzutnie złoży się w całość, nie oczekujemy, że mieszanina stanów ↑ i ↓ spontanicznie z powrotem wejdzie w superpozycję.

Bohr zrozumiał wagę łączącego świat klasyczny i kwantowy „nieodwracalnego aktu" pomiaru. Kilka lat później Wheeler pisał o „nieodwracalnym akcie amplifikacji". Jest dość oczywiste, że informacje o świecie kwantowym zdobywamy jedynie wtedy, gdy jesteśmy w stanie zwielokrotnić elementarne zdarzenia kwantowe, zamieniając je w zauważalne sygnały, takie jak odchylenie wskazówki miernika. Być może logiczne byłoby poszukiwanie *fizycznego* kolapsu całkowitej funkcji falowej właśnie tutaj, w trakcie tego procesu. Oszczędziłoby to kotu Schrödingera dyskomfortu pozostawania jednocześnie żywym i martwym, ponieważ nieodwracalny akt amplifikacji, towarzyszący rejestracji promieniowania przez licznik Geigera, już rozstrzygnął o stanie materii, w tę lub w drugą stronę.

Fizyk Dieter Zeh pierwszy zauważył, że oddziaływanie funkcji falowej z aparaturą pomiarową i jej „środowiskiem" prowadzi do gwałtownego, nieodwracalnego rozłączenia składników superpozycji w taki sposób, iż człony interferencyjne zostają stłumione. To jest dekoherencja, z którą po raz pierwszy spotkaliśmy się w rozdziale 6, ale znowu wymagająca działania w realnym sensie fizycznym, ponieważ chcemy zastosować ją do realnej funkcji falowej.

Zatrzymajmy się i pomyślmy, jak miałoby to działać. Jak widzieliśmy, pierwszy stopień interakcji pomiarowej prowadzi do splątania tego, co powoduje oddziaływanie w całkowitej funkcji falowej. Potem następuje kolejne oddziaływanie i kolejne, i kolejne. Moglibyśmy założyć, że ta sekwencja trwa tak długo, aż klasyczne urządzenie pomiarowe zostanie w pełni splątane w całkowitej funkcji falowej, co rodzi możliwość superpozycji – oraz interferencji – obiektów o rozmiarach klasycznych, takich jak wskazówka odchylająca się w dwie strony naraz lub kot, który jest jednocześnie żywy i martwy. Mogłoby to oznaczać, że splątanie klasycznego urządzenia pomiarowego z układem kwantowym jest całkowicie *spójne* (*koherentne*).

Jednak, oczywiście, nie licząc pewnych wyjątków, które opiszę poniżej, *nigdy* nie obserwujemy superpozycji obiektów klasycznych. Dowodzi się, że wraz z rosnącą złożonością sekwencji oddziaływań dochodzi do szybkiej utraty spójności, niezbędnej do podtrzymania integralności członów interferencyjnych. Człony interferencyjne zostają gruntownie osłabione i funkcja falowa ulega losowej redukcji do takiego czy innego wyniku. To proces praktycznie nieodwracalny.

W tym scenariuszu funkcja falowa nie ulega „kolapsowi" natychmiastowo. Czas potrzebny na wystąpienie efektów tego rodzaju fizycznej dekoherencji jest w oczywisty sposób związany z rozmiarem badanego układu i liczbą cząstek w urządzeniu i środowisku, z którymi oddziałuje. Im krótszy jest „czas dekoherencji", tym szybciej funkcja falowa traci swoją spójność i ewoluuje, wraz z urządzeniem i jego środowiskiem, do postaci, którą postrzegamy jako układ klasyczny.

Spójrzmy na to z pewnej perspektywy. Szacuje się, że czas dekoherencji dla poruszającej się w powietrzu dużej molekuły, o promieniu rzędu milionowej (10^{-6}) części centymetra, jest wielkością rzędu milionowej bilionowej bilionowej (10^{-30}) części sekundy[176]. To znaczy, że molekuła staje się „klasyczna" w niewyobrażalnie krótkim czasie. Gdybyśmy usunęli powietrze i obserwowali molekułę w próżni laboratoryjnej, moglibyśmy zredukować liczbę możliwych interakcji, co pozwoliłoby nam zwiększyć szacowany czas dekoherencji do 10^{-17} sekundy – jest to już czas dostatecznie długi, by go sobie wyobrazić (i potencjalnie mierzalny). Umieszczenie molekuły w przestrzeni międzygalaktycznej, gdzie byłaby narażona tylko na fotony mikrofalowego promieniowania tła, zwiększyłoby szacowany czas dekoherencji do 10^{12} sekund, co znaczy, że molekuła mogłaby trwać jako układ kwantowy (na przykład w stanie superpozycji) niemal przez 32 tysiące lat.

Natomiast cząstka kurzu o promieniu rzędu tysięcznej części centymetra – tysiąc razy większym niż molekuła – ma czas dekoherencji równy jednej mikrosekundzie (10^{-6} sekundy), nawet w przestrzeni międzygalaktycznej. Cząstka kurzu zachowuje się

klasycznie nawet tutaj, gdzie prawdopodobna liczba oddziaływań ze środowiskiem jest najniższa.

Niewątpliwie w przypadku takich obiektów kwantowych jak fotony, elektrony i poszczególne atomy czas dekoherencji we wszelkich innych rozważanych środowiskach będzie dłuższy. Jednak tam, gdzie w grę wchodzi bardzo duża liczba oddziałujących cząstek, na przykład w trakcie interakcji układów kwantowych z urządzeniem pomiarowym i jego środowiskiem, czas dekoherencji staje się ekstremalnie krótki. Dlatego można założyć, że przejście między zachowaniem kwantowym a klasycznym odbywa się praktycznie natychmiastowo i nieodwracalnie.

Zakresy przedziałów czasowych, w jakich można spodziewać się wystąpienia dekoherencji, sugerują, że w konwencjonalnym doświadczeniu byłoby bardzo trudno – o ile w ogóle możliwe – uchwycić układ kwantowy w trakcie utraty spójności. Przypomnij sobie jednak, że to jeden z tych przypadków, gdy rozmiar naprawdę *ma* znaczenie. Możliwe jest znalezienie układów o rozmiarach w skali pośredniej, *między* kwantową a klasyczną, dla których czasy dekoherencji wynoszą od mikrosekund do milisekund. Dekoherencję obserwowano bezpośrednio w układach obejmujących uwięzione jony berylu, a także silnie wzbudzone atomy rubidu umieszczone we wnękach z fotonami promieniowania mikrofalowego[177]. Jeżeli nie dopuścimy do tego, by dekoherencja zaszła za daleko, możliwe jest odwrócenie procesu i obserwowanie przywrócenia funkcji falowej w wyniku *rekoherencji*[178].

Zjawisko dyfrakcji i interferencji w skali pośredniej zademonstrowano, posługując się molekułami o strukturze klatkowej, zawierającymi 60 atomów węgla (zwanymi buckminsterfullerenami) i 70 atomów węgla (fuleren C_{70}), a niedawno również dużymi molekułami organicznymi zawierającymi do 430 atomów[179]. W doświadczeniach przeprowadzonych z tak zwanym nadprzewodnikowym interferometrem kwantowym (SQUID) zaobserwowano interferencję stanów obejmujących około miliarda par elektronów *poruszających się w przeciwnych kierunkach* wokół nadprzewodzącego pierścienia dostatecznie dużego, by zobaczyć go

gołym okiem[180]. Takie układy zostały opisane jako laboratoryjne równoważniki stanów kota Schrödingera.

Eksperymenty te pokazują, że zjawisko, o którym myśleliśmy dotąd jako o kolapsie funkcji falowej, nie jest jakąś abstrakcją filozoficzną czy matematyczną, lecz realnym procesem fizycznym, który można obserwować i mierzyć. Obrazują nam również rozmiary, do których należy zejść, by uniknąć ekspozycji na wpływ środowiska, mogącego wywołać błyskawiczną dekoherencję.

W tej sytuacji zastanawiające może się wydawać, jak to możliwe, że rutynowo obserwujemy zjawisko interferencji, wymagające spójnej superpozycji wielu fotonów, skoro spójność kwantowa jest tak delikatna i trudna do utrzymania. Dzieje się tak dlatego, że oddziaływania występujące w polu elektromagnetycznym obejmującym dużą liczbę fotonów to w głównej mierze oddziaływania typu foton–foton. Takie oddziaływania zachodzą, ale są ekstremalnie słabe. Na pierwszy rzut oka fotony w ogóle ze sobą nie oddziałują i jako takie nie są znaczącym źródłem dekoherencji w silnym polu elektromagnetycznym. Spójność zostaje zachowana i w większej skali bez trudu daje się zaobserwować interferencję.

Zaczyna to wyglądać na realny postęp. Fizyczne wyjaśnienie kolapsu funkcji falowej z pewnością musi rozwiązać problem pomiaru kwantowego. A skoro kolaps jest czymś realnym fizycznie, to i funkcja falowa musi być realna fizycznie. Jak mogłaby nie być? Musi być coś fizycznego, co ulega dekoherencji.

Jednak do tej pory powinno już być jasne, że w mechanice kwantowej nigdy nie należy zapędzać się za daleko. Niestety, jak dowodził Bell, dekoherencja *nie* rozwiązuje problemu pomiaru:

> Pomysł, że wyeliminowanie spójności w ten czy inny sposób pociąga za sobą zastąpienie „i” słowem „lub”, jest bardzo popularny wśród rozwiązujących „problem pomiaru”. To zawsze mnie zastanawiało[181].

Dekoherencja tłumi człony interferencyjne, rozmywając je na ogromną liczbę stanów w urządzeniu pomiarowym i jego środowisku. Możemy twierdzić, że ewoluujący pomiar wymusza „bazę

uprzywilejowaną", która z konieczności zgadza się ze sposobem dokonywania pomiaru, a więc i z naszym klasycznym doświadczeniem. Przeprowadzamy pomiar i odnotowujemy, że cząstka była albo w stanie ↑, albo w stanie ↓, ponieważ tak zostało przygotowane urządzenie pomiarowe i takie wyniki są „mocnymi" efektami dekoherencji. Jednak dekoherencja, jako mechanizm fizyczny, nie może *wymusić* wyboru między wszystkimi możliwościami. To, że losowo otrzymujemy wynik ↑ lub ↓, zasadniczo pozostaje zagadką. Dekoherencja nie może wyjaśniać prawdopodobieństwa kwantowego, nie może zmienić ↑ *i* ↓ w ↑ *lub* ↓.

Fizyk matematyczny Roger Penrose dokonał podobnej obserwacji:

> [Dekoherencja] nie pomaga nam wytłumaczyć, dlaczego widzimy kota albo żywego, albo martwego. [...] taki opis jest niewystarczający [...] Ten brakujący element fizyki nazwę skrótem **OR**, oznaczającym obiektywną redukcję. Obiektywnie zdarza się albo jedna rzecz, albo druga. Brakuje nam teorii, która pozwala określić, co się zdarzy. **OR** to odpowiedni skrót, ponieważ po angielsku oznacza on „lub", a o to właśnie chodzi: zdarza się jedno **lub** drugie[182].

Teoretyk Roland Omnès nazwał ten problem „obiektywizacją". W kontekście dekoherencji pozostaje on nierozwiązany.

No dobrze, jest to więc nieco rozczarowujące. Co jednak z implikacjami doświadczalnego obserwowania dekoherencji, gdy chodzi o realność funkcji falowej? Czy przynajmniej tutaj znajdziemy jakieś ukojenie?

Niestety, nie. Dekoherencja stanowi mechanizm o decydującym znaczeniu, ale sama w sobie nie jest odrębną interpretacją mechaniki kwantowej. W istocie, jak przekonaliśmy się już w przypadku interpretacji spójnych lub dekoherentnych historii, jest ona mechanizmem, który najlepiej nadaje się do wykorzystania *w ramach* danej interpretacji do ustalenia „podejrzanego podziału" między królestwem kwantowym a klasycznym. Jako taka sprawuje

się jednakowo dobrze w interpretacjach realistycznych i antyrealistycznych.

Pozwól, że wyjaśnię. Ogromnie kusi nas konkluzja, że fizyczny proces dekoherencji oznacza realny fizycznie stan kwantowy. To zrozumiałe. Nadal jednak mamy pełną swobodę i możemy założyć, że dekoherencja stosuje się do układu, który postanowiliśmy opisać w kategoriach funkcji falowej, ta zaś po prostu zawiera *informację* o tym układzie. Zamiast realnej funkcji falowej, razem z jej członami interferencyjnymi, zaczynającymi się rozmywać w coraz bardziej złożonych oddziaływaniach związanych z pomiarem, śledzimy ewolucję *informacji*, którą ona przypuszczalnie zawiera. Tak jak wcześniej, wymuszony wybór między możliwymi wynikami pomiaru nie jest niczym więcej jak zwykłą aktualizacją naszej wiedzy.

Być może uważasz, że koncepcja informacji wydaje się zbyt sztuczna lub abstrakcyjna, by mieć konsekwencje realne fizycznie, ale zarówno interpretacje relacyjne, jak i te oparte na teorii informacji dotyczą realnej fizyki. Po prostu chodzi o to, że nie potrzebują do tego realistycznej interpretacji funkcji falowej. Co więcej, również nasz wywód na temat relacji między pomiarem kwantowym a entropią z łatwością dałoby się oprzeć na informacyjnej zawartości funkcji falowej.

W 1984 roku matematyk i inżynier Claude Shannon rozwinął wczesną, ale bardzo skuteczną postać teorii informacji. Shannon pracował w Laboratoriach Bella w New Jersey, prestiżowym ośrodku badawczym firmy AT&T (American Telephone and Telegraph) i Western Electric (obecnie filii badawczo-rozwojowej firmy Alcatel-Lucent). Interesował się wydajnością przekazu informacji za pomocą takich kanałów komunikacyjnych jak telegraf. Odkrył, że „informacja” jako koncepcja może mieć coś, co normalnie uważalibyśmy za własności fizyczne. W szczególności ma entropię, którą znamy dzisiaj pod nazwą „entropii Shannona”. Pod wieloma względami jest ona równoważna wywodzącej się z mechaniki kwantowej „entropii von Neumanna”.

W 1961 roku ten rodzaj logiki doprowadził fizyka z IBM Rolfa Landauera do stwierdzenia, że „informacja jest fizyczna”. Jego zainteresowania skupiały się wokół przetwarzania informacji

w komputerze. Doszedł do wniosku, że kiedy informacja jest wymazywana podczas obliczeń, w rzeczywistości zostaje usunięta do otaczającego procesor środowiska i podnosi jego entropię. Ten wzrost entropii skutkuje wzrostem temperatury: otoczenie procesora się ogrzewa. Każdy, kto kiedykolwiek przeprowadzał na swoim laptopie skomplikowane obliczenia, zauważył, że po krótkiej chwili komputer zaczyna się robić nieprzyjemnie gorący.

Słynne stwierdzenie Landauera wymaga dość starannego objaśnienia, na razie wystarczy jednak zauważyć wyraźny związek między przetwarzaniem informacji a takimi wielkościami fizycznymi jak entropia i temperatura. Wydaje się, że „informacja" nie jest wymyśloną przez ludzki umysł abstrakcyjną koncepcją. Może mieć realne, fizyczne konsekwencje.

Podsumowując: chodzi o to, że obserwacja fizycznej dekoherencji nie może być traktowana jako dowód na to, iż funkcja falowa odpowiada realnemu fizycznie stanowi układu kwantowego. Tak, dekoherencji musi podlegać coś fizycznego, ale równie dobrze sprawdzi się tutaj interpretacja oparta na informacji.

Dekoherencja zapewnia bazę fizyczną dla zrozumienia przejścia między światem kwantowym a klasycznym, ale w tym celu opiera się na konwencjonalnej mechanice kwantowej, ekstrapolowanej do złożonych, wielkoskalowych systemów. W tym sensie jedynym aspektem „dodanym" do formalizmu jest złożoność, która poza tym jest nieobecna lub wręcz ignorowana. Zważywszy na to, że dekoherencja jest już stosunkowo dobrze udokumentowana doświadczalnie, wydaje się dziwne, iż w podręcznikach dla studentów zjawisko to często jest pomijane milczeniem[183]. Prosta prawda jest taka, że dekoherencja nie likwiduje zapotrzebowania na strukturę interpretacyjną i ponownie ci z fizyków, którzy przykładają mniejszą wagę do interpretacji i znaczeń, wolą unikać zamieszania wokół przejścia świat kwantowy–świat klasyczny, ponieważ tego naprawdę nie potrzebują.

Mimo to nic nas nie powstrzyma przed pójściem ciut dalej. Dlaczego, ciesząc się krótką wizytą u wybrzeży Rzeczywistości Metafizycznej, nie uzupełnić mechaniki kwantowej o całkiem nowy mechanizm fizyczny, taki, który unika „podejrzanego podziału" bez

wpadania w problem obiektywizacji? W 1986 roku tak właśnie zrobili fizycy Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini i Tullio Weber. Stworzona przez nich pierwotna wersja teorii została później dopracowana i rozszerzona przez Philipa Pearle'a i innych, jednak dla uproszczenia nadal będę nazywał ją teorią GRW[184].

GRW postanowili dodać do formalizmu kwantowego nowy człon matematyczny. Ten nowy człon skutkuje poddaniem funkcji falowej (interpretowanej realistycznie) losowym, spontanicznym lokalizacjom czy też skokom lub „trafieniom", jeśli wolisz. Zamiast, zgodnie z Aksjomatem Piątym, niczym nieniepokojona sunąć elegancko w przestrzeni po trajektorii wyznaczonej przez równanie Schrödingera, funkcja falowa jest co rusz szturchana kwantowym odpowiednikiem elektrycznego poganiacza, który zmusza ją do kolapsu i zwinięcia się w sobie niczym przerażony jeżozwierz. GRW odkryli, że prawidłowe działanie tego mechanizmu wymaga wprowadzenia dwóch nowych stałych fizycznych. Pierwsza z nich odnosi się do „dokładności lokalizacji", określającej wymiary funkcji, która w momencie „trafienia" łączy się z opisującą superpozycję całkowitą funkcją falową. Badacze przyjęli dokładność lokalizacji równą około 10^{-5} centymetra.

Druga z tych nowych stałych odpowiada średniej częstotliwości spontanicznej lokalizacji. GRW przyjęli dla niej wartość równą 10^{-16} na sekundę. To oznacza, że funkcja falowa jest lokalizowana średnio raz na każde sto milionów lat. Jednak, tak jak dekoherencja, częstotliwość ta jest wrażliwa na *liczbę* oddziałujących cząstek. Zatem układ złożony ulega lokalizacji ze średnią częstotliwością równą liczbie cząstek pomnożonej przez 10^{-16} na sekundę.

Oznacza to, że funkcja falowa układu kwantowego, składającego się z jednej cząstki lub niewielkiej ich liczby, *nigdy* nie ulega lokalizacji: kontynuuje swoją ewolucję w czasie zgodnie z równaniem Schrödingera. Wobec takiego doboru stałych teoria GRW praktycznie niczym nie różni się od konwencjonalnej mechaniki kwantowej, przynajmniej dla układów kwantowych. Jednak dowolne urządzenie pomiarowe będzie się składało z bilionów bilionów cząstek, a wówczas średnia częstotliwość lokalizacji wzrasta tak bardzo, że funkcja falowa ulega lokalizacji (kolapsowi) w ciągu kilku

miliardowych części sekundy: „kot Schrödingera pozostaje zarazem żywy i martwy nie dłużej niż przez ułamek sekundy”[185].

Oprócz oczywistych podobieństw do dekoherencji mechaniki kwantowej teoria GRW zapewnia dodatkową przewagę w postaci wymuszania określonego wyniku pomiaru, choć w dalszym ciągu jest to proces zdecydowanie losowy, związany ze spontanicznymi lokalizacjami.

Istnieją wersje mechanizmów spontanicznego kolapsu, które są wariacjami na temat GRW, ale rozwiązują problem zastosowań, na przykład do układów kwantowych złożonych z zespołu identycznych cząstek, i które sprawiają, że mechanizm kolapsu jest ciągły. Powinniśmy zaakceptować fakt, że doczepianie tego typu mechanizmów do konwencjonalnej mechaniki kwantowej służy jedynie zaspokojeniu potrzeb wynikających z naszych metafizycznych prekoncepcji dotyczących realności funkcji falowej (Trzeci Sąd Logiczny). Jednak chociaż możemy wzdragać się przed takim doraźnym „obejściem”, to powinniśmy również przyznać po raz kolejny, że to realistyczne rozszerzenie obudziło ciekawość wystarczającą, by podjąć poszukiwanie dowodów empirycznych. Inaczej mówiąc, zgodnie z Czwartym Sądem Logicznym (zob. dodatek) teoria GRW jest interpretacją „aktywną”. Wysiłki czynione w celu wykrycia dekoherencji w układach w skali pośredniej to również w dużej mierze próby ogniowe dla potencjalnych dowodów na proces spontanicznego kolapsu. Mimo że do tej pory nie znaleziono jeszcze przekonujących dowodów, Ghirardi jest optymistą: „wydaje się, że testy w pełni różnicujące nie są całkiem poza zasięgiem”[186]. Więcej na ten temat w dalszej części rozdziału.

Jednak wprowadzenie nowych stałych fizycznych zawsze jest mniej satysfakcjonujące niż znalezienie rozwiązania problemu, które w naturalny sposób samo wyłania się z teorii.

Przypomnij sobie, że Einstein w późniejszym okresie życia skłaniał się ku założeniu, iż wszystkie te problemy znalazłyby rozwiązanie w ramach jakiejś trudno uchwytnej teorii wielkiej unifikacji. Mechanika kwantowa to najwyraźniej nie koniec. Nie jest jeszcze skończona. W przeciwieństwie do ogólnej teorii względności, w której czas i przestrzeń są emergentne, w mechanice kwantowej

stanowią tło, z założenia nie różniąc się zbytnio od metafizycznych absolutów Newtona. Rodzi to niezwykle ważne pytanie. Czy może nas uratować kwantowa teoria grawitacji?

W ogólnej teorii względności działanie na odległość, implikowane przez newtonowską siłę grawitacji, zostaje zastąpione zakrzywieniem czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni w danym obszarze wiąże się z gęstością obecnej w nim masy i energii. Wheeler wytłumaczył to następująco: „Czasoprzestrzeń mówi materii, jak się poruszać, a materia mówi czasoprzestrzeni, jak się zakrzywiać”[187].

Kierując się tą logiką, pewna grupa fizyków, poczynając od Feynmana, zasugerowała, że być może jakąś rolę w mechanice kwantowej odgrywa sama struktura czasoprzestrzeni. Lajos Diósi (w 1987 roku), a potem Roger Penrose (w 1996 roku) zaproponowali inny rodzaj mechanizmu spontanicznego kolapsu, obecnie nazywany teorią Diósiego–Penrose’a[188]. Dowodzili oni, że kiedy superpozycja napotka region o znaczącej krzywiźnie czasoprzestrzeni, zacznie się załamywać, by w końcu ulec kolapsowi w określony stan kwantowy. Inaczej niż w teorii dekoherencji lub GRW, gdzie kluczem do kolapsu jest *liczba* cząstek, w teorii Diósiego–Penrose’a ważna jest *gęstość* masy i energii, ponieważ to ona określa rozmiar zakrzywienia otaczającej je czasoprzestrzeni. Roger Penrose pisze w swojej popularnonaukowej książce *Nowy umysł cesarza*:

> Według mnie, ilekroć czasoprzestrzeń jest „dostatecznie” mocno zakrzywiona, przestaje obowiązywać zasada kwantowej liniowej superpozycji. W tym momencie liniowa superpozycja zespolonych amplitud wszystkich potencjalnie możliwych stanów ustępuje miejsca zbiorowi prawdopodobieństw tych stanów, z których *w rzeczywistości* zrealizowany jest tylko jeden[189].

To potencjalnie całkiem eleganckie rozwiązanie. W skali kwantowej efekty grawitacyjne (krzywizna czasoprzestrzeni) są nieznaczne, pozostawiając funkcji falowej swobodę ewoluowania zgodnie z równaniem Schrödingera. Jednak gdy funkcja falowa napotka klasyczne urządzenie pomiarowe, te efekty znacząco rosną w siłę.

Oczywiście układ kwantowy zostaje stworzony w laboratorium, które znajduje się w ziemskim polu grawitacyjnym, dlatego Penrose zasugerował, że to *różnica* między krzywiznami czasoprzestrzeni w tych dwóch sytuacjach jest czynnikiem wywołującym kolaps.

Teoria Diósiego–Penrose'a wyjaśnia, jak mogłyby wyglądać mechanizmy działania spontanicznego kolapsu wywołanego grawitacyjnie lub zgodnie z teorią GRW. Problem w tym, że wywody te nie wynikają z żadnej w pełni ukształtowanej kwantowej teorii grawitacji. Niestety, ku naszemu rozczarowaniu żadna z obecnych czołowych kandydatek na tego typu teorię – pętlowa grawitacja kwantowa (moja ulubiona) ani teoria superstrun – nie może nam jeszcze zaoferować jakiegokolwiek głębszego wyjaśnienia tej kwestii. Rzeczywiście, pojawiały się pewne trafne spostrzeżenia, jak sugestia Smolina, że nielokalność w mechanice kwantowej mogłyby uzasadniać przewidywane przez pętlową grawitację kwantową nielokalne połączenia *między* kwantami przestrzeni[190]. Nadal jednak jest zbyt wcześnie, by mieć co do czegokolwiek pewność. Z tego co wiem, wspomniane teorie grawitacji kwantowej nadal pozostają w ścisłej zależności od mechaniki kwantowej jako teorii podstawowej i same w sobie nie wymagają, by ta podstawa była w jakimkolwiek stopniu zmieniona[191].

Wydaje się mało prawdopodobne, by teoria już wkrótce udzieliła nam jakichkolwiek odpowiedzi. Mimo to po raz kolejny mieliśmy okazję obserwować, jak hipotezy oparte na interpretacjach realistycznych motywują społeczność eksperymentatorów. Wystarczy jakakolwiek sugestia – czasem naprawdę nieprzekonująca, lecz dająca się zweryfikować doświadczalnie – że rzeczywistość może być inna, niż nam się wydaje, by natychmiast skupili na niej uwagę. To więcej niż trzeba, by z powrotem wspiąć się na pokład Statku Nauki i pożeglować ku brzegom Rzeczywistości Empirycznej.

W swojej niedawno wydanej książce *Moda, wiara i fantazja w nowej fizyce Wszechświata* Roger Penrose podsumowuje „różne funkcjonujące obecnie propozycje" testowania tych pomysłów[192]. Jedna z tych propozycji, obejmująca zainstalowane na orbitującym satelicie makroskopowe rezonatory kwantowe (MAQRO), ma na celu badanie przewidywań mechaniki kwantowej dla superpozycji

obiektów składających się z więcej niż stu milionów atomów[193]. Istnieje nadzieja, że w tych okolicznościach uda się wychwycić eksperymentalnie subtelne różnice między przewidywaniami mechaniki kwantowej oraz teorii GRW i Diósiego–Penrose'a.

MAQRO zalicza się do misji kosmicznych „średniego rozmiaru". Po raz pierwszy zaproponowano ją Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) w 2010 roku, a następnie, po znaczącej modernizacji, jeszcze raz w 2015 roku[194]. We wrześniu 2016 roku została ponownie zgłoszona w odpowiedzi na konkurs ESA „Nowe idee naukowe" i w 2018 roku wybrana do dalszych szczegółowych badań, prowadzonych przez ESA w ramach Concurrent Design Facility[195].

Jeśli ten program dostanie zielone światło, wykorzysta całą wiedzę zgromadzoną dzięki niedawnej udanej misji sondy LISA Pathfinder, wystrzelonej w grudniu 2015 roku, którą zaprojektowano w celu przetestowania technologii zdolnej wykrywać w przestrzeni fale grawitacyjne[196].

Koszt misji LISA Pathfinder, szacowany w 2011 roku, to 400 milionów euro[197]. Biorąc to pod uwagę, jest mało prawdopodobne, by satelita MAQRO, o ile zostanie wdrożony do realizacji, został wystrzelony w ciągu najbliższych dziesięciu lub więcej lat, ponieważ jest nieuniknione, że jego budżet będzie znacząco większy. Jak pisałem wcześniej, prekoncepcje metafizyczne, które dają początek przekonaniom realistycznym wśród fizyków kwantowych, są na ogół bardzo kosztowne.

Misja MAQRO z pewnością będzie miała do wykonania więcej zadań aniżeli testowanie odwzorowania rzeczywistości kwantowej w superpozycjach makroskopowych, jednak cena, jaką przyjdzie za to zapłacić, będzie wyższa niż konieczność zmagania się z więcej niż kilkoma filozoficznymi zagadkami (i sporadycznym bólem głowy).

168 Zob. np.: Giuseppe Pucci, Daniel M. Harris, Luiz M. Faria i John W.M. Bush, *Walking Droplets Interacting with Single and Double Slits*, „Journal of Fluid Mechanics" 2018, nr 835, s. 1136–1156.

169 Zob. Natalie Wolchover, *Famous Experiment Dooms Alternative to Quantum Weirdness*, „Quanta Magazine", 11 października 2018 roku, https://www.quantamagazine.org/famous-experiment-dooms-pilotwave-alternative-to-quantum-weirdness-20181011/ (dostęp 7.01.2021).

170 Peter R. Holland, *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie–Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1993, s. 475.

171 Ibidem, s. 462.

172 Albert Einstein, list do Maxa Borna, 12 maja 1952 roku. Cyt. za: John S. Bell, *Proceedings of the Symposium on Frontier Problems in High Energy Physics*, Piza, czerwiec 1976, s. 33–45. Artykuł został ponownie opublikowany w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*…, op. cit., s. 81–92. Cytat pojawia się na s. 91.

173 Zob. James T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, University of Chicago Press, Chicago 1994.

174 John S. Bell, *On the Impossible Pilot Wave*, „Foundations of Physics" 1982, nr 12, s. 989–999. Artykuł został ponownie opublikowany w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*…, op. cit., s. 159–168.

175 John S. Bell, *Against Measurement*, „Physics World" 1990, nr 3, s. 33.

176 Są to szacunki zaczerpnięte z: Roland Omnès, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton 1994. Oryginalne obliczenia zostały przedstawione w: Erich Joos i H. Dieter Zeh, *The Emergence of Classical Properties through Interaction with the Environment*, „Zeitschrift für Physik B" 1985, nr 59, s. 223–243.

177 Przykłady zob. Serge Haroche, *Entanglement, Decoherence and the Quantum/Classical Boundary*, „Physics Today", lipiec 1998, s. 36–42.

178 Frédéric Bouchard, Jérémie Harris, Harjaspreet Mand, Nicolas Bent, Enrico Santamato, Robert W. Boyd i Ebrahim Karimi, *Observation of Quantum Recoherence of Photons by Spatial Propagation*, „Nature Scientific Reports" 2015, nr 5, s. 15330.

179 Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw i Anton Zeilinger, *Wave-particle Duality of C_{60} molecules*, „Nature" 1990,

nr 401, s. 680–682; Markus Arndt, Olaf Nairz, J. Petschinka i Anton Zeilinger, *High Contrast Interference with C_{60} and C_{70}*, „Comptes Rendus de l'Académie des Sciences –Series IV – Physics" 2001, nr 2, s. 581–585; Stefan Gerlich, Sandra Eibenberger, Mathias Tomandl, Stefan Nimmrichter, Klaus Hornberger, Paul J. Fagan, Jens Tüxen, Marcel Mayor i Markus Arndt, *Quantum Interference of Large Organic Molecules*, „Nature Communications" 2011, nr 2, s. 263. Analogiom i kalamburom nie ma końca. Stosunek średnicy molekuły C_{66} do rozstawu siatki azotku krzemu, używanej w obserwacji wzoru dyfrakcyjnego, jest porównywalny ze stosunkiem średnicy konwencjonalnej piłki nożnej do szerokości bramki (zgodnej ze standardami FIFA), co nadaje potencjalnie nowe znaczenie wyrażeniu „podkręć ją jak Beckham".

180 Zob. np. Jonathan R. Friedman, Vijay Patel, W. Chen, S.K. Tolpygo i J.E. Lukens, *Quantum Superposition of Distinct Macroscopic States*, „Nature" 2000, nr 406, s. 43–46; Caspar H. Van der Wal, A.C.J. ter Haar, F.K. Wilhelm, R.N. Schouten, C.J.P.M. Harmans, T.P. Orlando, Seth Lloyd i J.E. Moonij, *Quantum Superposition of Macroscopic-Persistent States*, „Science" 2000, nr 290, s. 773–777.

181 John S. Bell, *Against Measurement*, op. cit., s. 33.

182 Roger Penrose, *Makroświat, mikroświat i ludzki umysł*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997. Zauważ, że kolaps funkcji falowej często jest nazywany „redukcją" funkcji falowej.

183 Na przykład w drugim wydaniu popularnego podręcznika Davida J. Griffithsa *Introduction to Quantum Mechanics*, opublikowanym w 2017 roku przez Cambridge University Press, dekoherencja jest wspomniana jedynie raz, w przypisie.

184 Zob. Giancarlo C. Ghirardi, Alberto Rimini i Tullio Weber, *Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems*, „Physical Review D" 1986, nr 34, s. 470–491; Philip Pearle, *Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization*, „Physical Review A" 1989, nr 39, s. 2277–2289. Choć nie są one całkiem równoważne, występujący w tytule artykułu *state-vector* (wektor stanu) można traktować jako coś podobnego do funkcji falowej.

185 John S. Bell, *Are There Quantum Jumps?*, w: C.W. Kilmister (red.), *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath*, Cambridge University Press, Cambridge 1987, s. 41–52. Przedruk artykułu ukazał się w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*…, op. cit., s. 201–212. Ten cytat występuje na s. 204.

186 Giancarlo Ghirardi, *Collapse Theories*, „Stanford Encyclopedia of Philosophy", aktualizacja: luty 2016, s. 51.

187 John Wheeler, Kenneth Ford, *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics*, W.W. Norton, Nowy Jork 1998, s. 235.

188 L. Diósi, *A Universal Master Equation for the Gravitational Violation of Quantum Mechanics*, „Physical Letters A", 1987, nr 120, s. 377–381; L. Diósi, *Models for Universal Reduction of Macroscopic Quantum Fluctuations*, „Physical Review A" 1989, nr 40, s. 1165–1174; Roger Penrose, *On Gravity's Role in Quantum State Reduction*, „General Relativity and Gravitation" 1996, nr 28, s. 581–600.

189 Roger Penrose, *Nowy umysł cesarza*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000, s. 407.

190 Zob. Jim Baggott, *Przestrzeń kwantowa*…, op. cit.

191 Co tłumaczy, dlaczego Rovelli i Smolin – którzy długo współpracowali nad pętlową grawitacją kwantową – każdy na swój sposób poszukiwali sposobu pogodzenia się z interpretacją mechaniki kwantowej.

192 Roger Penrose, *Moda, wiara i fantazja w nowej fizyce Wszechświata*, przeł. Łukasz Lamża, Copernicus Center Press, Kraków 2017.

193 Rainer Kaltenbaek, Gerald Hechenblaikner, Nikolai Kiesel, Oriol Romero-Isart, Keith C. Schwab, Ulrich Johann i Markus Aspelmeyer, *Macroscopic Quantum Resonators (MAQRO)*, „Experimental Astronomy" 2012, nr 34, s. 123–164, zob. także arXiv:quantph/1201.4756v2, 19 marca 2012 roku.

194 Rainer Kaltenbaek i in., *Macroscopic Quantum Resonators (MAQRO): 2015 Update*, „EPJ Quantum Technology" 2016, nr 3, s. 5.

195 Więcej szczegółów i informacje o postępach projektu na stronie http://maqromission.org/.

196 LISA to akronim od Laser Interferometer Space Antenna (Kosmiczna Antena Interferometru Laserowego).

197 https://spacenews.com/lisa-pathfinder-proceed-despite-100-cost-growth/ (dostęp 7.01.2021).

ROZDZIAŁ 9

Mechanika kwantowa jest niekompletna

Ponieważ musimy włączyć mój umysł

(a może powinien to być twój umysł?)

Ego von Neumanna, przyjaciel Wignera, Wszechświat partycypacyjny i kwantowy duch w maszynie

Oczywiście, problem kolapsu funkcji falowej nie wziął się z opublikowanej w 1932 roku książki von Neumanna *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Trzeba jednak oddać von Neumannowi, że jego podejście do pomiaru kwantowego naprawdę ujawniło w pełnej krasie problem, który od tej pory, przez mniej więcej kolejnych 90 lat, zadręczał wielkie umysły fizyków kwantowych i filozofów.

Jak się przekonaliśmy, antyrealiści nie widzą w kolapsie żadnego problemu, nie jest on trudniejszy do zrozumienia niż nagła zmiana w zasobie naszej wiedzy, gdy zdobywamy jakąś nową informację. Kilku teoretyków, skłaniających się bardziej ku realistycznym prekoncepcjom, dążyło do zidentyfikowania mechanizmów fizycznych, które oddziałują na fizycznie rzeczywistą funkcję falową i mogą wyjaśnić, jak *i* staje się *lub*.

Co jednak myślał o tym wszystkim sam von Neumann?

W swoim klasycznym tekście uczony wyraźnie rozróżnił dwa fundamentalnie różne rodzaje zjawisk kwantowych. Pierwszy z nich, określany przez niego mianem procesu **1**, jest nieciągłym, nieodwracalnym przekształceniem czysto kwantowego stanu w mieszaninę, obejmującym „rzutowanie" jakiejś początkowej funkcji falowej na jeden ze zbiorów możliwych wyników, czemu towarzyszy wzrost entropii. Obecnie nazywamy to kolapsem funkcji falowej, choć sam von Neumann nie korzystał z tej terminologii[198]. Drugi, proces **2**, jest ciągłą, deterministyczną i całkowicie odwracalną ewolucją funkcji falowej, rządzoną przez równanie Schrödingera zgodnie z Piątym Sądem Logicznym (zob. dodatek). Te dwa procesy są rozłączne: proces **1** wyklucza proces **2** i odwrotnie.

Następnie von Neumann spojrzał na pomiar kwantowy z perspektywy trzech fundamentalnych składowych, którym przypisał etykiety **I**, **II** i **III**:

I to badany układ kwantowy;
II to fizyczny pomiar;
III to „obserwator".

Von Neumann wykazał dalej, że jeśli układ kwantowy **I** został przygotowany w superpozycji wyników pomiaru (na przykład cząstka A znajduje się w superpozycji stanów ↑ i ↓), to będzie ewoluował gładko i w sposób ciągły zgodnie z procesem **2**. Po napotkaniu przyrządu pomiarowego funkcja falowa staje się splątana, ale von Neumann nie widział powodu, by przyjmować założenie, iż mechanika kwantowa przestaje obowiązywać w skali klasycznej. Splątana funkcja falowa musi więc kontynuować gładką ewolucję, zgodnie z równaniem Schrödingera. Proces **2** wciąż ma zastosowanie. Jeżeli później za naszą sprawą dojdzie do splątania urządzenia ze wskaźnikiem, doskonale już wiemy, że daje to początek kolejnej superpozycji, zawierającej składniki $A_{\uparrow}$🔓 i $A_{\downarrow}$🔒.

Von Neumann nie mógł znaleźć powodu opartego wyłącznie na matematyce, aby przyjmować, że proces **1** miałby odgrywać jakąkolwiek rolę w złożonym układzie **I** plus **II**. Proces **2** odnosi się na równi do klasycznych urządzeń pomiarowych i wskazówek oraz do układów kwantowych.

Schrödinger miał opublikować artykuł zawierający nawiązanie do swego słynnego kota dopiero za trzy lata, tymczasem von Neumann już był świadomy konsekwencji nieskończonego cofania się. Zaproponowane przez niego rozwiązanie było jednak jasne. Jeżeli mechanika kwantowa opisywana przez proces **2** stosuje się równie dobrze do klasycznych urządzeń pomiarowych, to tym bardziej nie ma powodu, by sądzić, że przestaje mieć zastosowanie, gdy rozważamy działanie ludzkich organów zmysłowych, ich połączenia z mózgiem i sam mózg. Załóżmy, że w laboratorium znajdują się lampy sufitowe, które oświetlają tarczę wskaźnika i część odbitego od niej światła trafia na siatkówkę oka obserwatora. To sprawia, że sygnały elektryczne zaczynają biec w nerwach optycznych obserwatora, by dotrzeć do kory wzrokowej, znajdującej się w tylnej części mózgu obserwatora.

Możemy po prostu rozszerzyć definicję „układu kwantowego” w punkcie **I**, by zawierał on cząstkę A, klasyczne urządzenie pomiarowe, wskaźnik i odbite światło. Składnik **II** – „pomiar fizyczny” – zawiera więc aparat zmysłowy obserwatora i mózg. Jako wynik uzyskujemy kolejną superpozycję:

Wynika z tego, że obserwator wchodzi w superpozycję „stanów mózgu”, 🧠 i 🧠.

Von Neumann napisał:

> Teraz mechanika kwantowa opisuje zdarzenia, które zachodzą w części świata objętej obserwacją dopóty, dopóki nie wchodzą one w interakcję z częścią przeprowadzającą obserwacje, z udziałem procesu **2** […], jednak kiedy tylko

dojdzie do takiej interakcji, np. pomiaru, wówczas konieczne jest stosowanie procesu **1**[199].

Co więc miał na myśli, gdy pisał o „części świata objętej obserwacją”? Na podstawie rozmów, jakie prowadził ze swoim rodakiem, węgierskim fizykiem Leo Szilardem, można sądzić, że von Neumann sugerował, iż składnik **III** zawiera „abstrakcyjne ego” obserwatora. Innymi słowy, proces **I** – kolaps funkcji falowej – zachodzi tylko wtedy, gdy wynik pomiaru jest rejestrowany przez *świadomy umysł* obserwatora.

Logika jest raczej niezaprzeczalna. Żaden obserwator nigdy nie poinformował o tym, że doświadczył superpozycji stanów mózgu (albo, przynajmniej, nie potraktowano by poważnie kogoś, kto twierdziłby, że bezpośrednio doświadczył takiej superpozycji). Natura składników **I** i **II** jest całkowicie „mechaniczna” – wywodzą się one wyłącznie z fizyki i chemii. Pozostaje wysnuć wniosek, że ponieważ **III** nie jest mechaniczny, to właśnie tu musi dochodzić do załamania ciągłości ewolucji funkcji falowej – procesu **2** – i zastąpienia jej procesem **1**.

Niemniej jednak wniosek ten jest dość niezwykły z uwagi na zapisaną na kartach *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* misję von Neumanna, którą było znalezienie dużo pewniejszych podstaw matematycznych dla mechaniki kwantowej z wykorzystaniem aksjomatycznego podejścia Hilberta. Jak już wspominałem, aksjomaty te (zwłaszcza Aksjomat Pierwszy) posłużyły do umocnienia interpretacji kopenhaskiej na pozycji jedynego słusznego wzorca bezpośrednio w samym formalizmie. Choć Bohr wypowiadał się bardziej niejednoznacznie o tym, co to naprawdę oznacza, perspektywa wskazywana przez Heisenberga była zdecydowanie antyrealistyczna. Tymczasem w swojej teorii pomiaru kwantowego von Neumann wyszedł daleko poza interpretację kopenhaską, ignorując naciski Bohra na arbitralne wyznaczenie granicy podziału na świat kwantowy i klasyczny.

Zaryzykowałbym twierdzenie, że wprowadzenie roli świadomości do procesu pomiaru stanowi *dodatek* do konwencjonalnego formalizmu kwantowego, na pierwszy rzut oka sprzeczny z aksjomatem „nie ma

tu na co patrzeć". Zgaduję, że von Neumann odpowiedziałby, iż Aksjomat Pierwszy odnosi się wyłącznie do struktury *matematycznej*, a wprowadzony dodatek w postaci składnika **III** z całą pewnością nie jest matematyczny. Napisał: „**III** pozostaje poza obliczaniem"[200].

W takim stanie rzeczy teoria von Neumanna wciąż może być interpretowana na dwa diametralnie różne sposoby. Antyrealista zgodziłby się z opisem składników **I** i **II**, interpretując **III** nie jako fizyczny kolaps, ale jako rejestrowanie wyniku eksperymentu i uaktualnianie stanu wiedzy obserwatora na jego temat. Z całą pewnością obejmuje to świadomy umysł obserwatora, lecz tylko w znaczeniu pasywnym, co wiedzie nas z powrotem do relacyjnej mechaniki kwantowej, ewentualnie do interpretacji wywodzących się z teorii informacji lub QBismu (do wyboru).

Wydaje się jednak, że von Neumann miał inny pogląd. Składnik **III** został wprowadzony z zamiarem udostępnienia miejsca, w którym zachodzi proces **I**, rozważany jako *rzeczywisty fizyczny kolaps*. Jego długie rozmowy z Szilardem koncentrowały się wokół późniejszych prac dotyczących zmniejszania entropii układów termodynamicznych w wyniku ingerencji istot inteligentnych, czyli wariantu demona Maxwella[201]. Filozof Max Jammer zauważa, że tego typu artykuł „wyznacza początek pewnych skłaniających do refleksji rozważań na temat skutków *fizycznej interwencji* umysłu w materię"[202].

Rzeczywisty kolaps fizyczny wymaga, aby rzeczywista była również funkcja falowa, a stąd wynika znacznie aktywniejsza rola świadomego umysłu obserwatora. To dlatego teorie, w których świadomy umysł doprowadza do kolapsu, włączam do mojej kolekcji realistycznych interpretacji mechaniki kwantowej. Fakt, że von Neumann nie wyraził się szczegółowo, jak jego zdaniem powinna być interpretowana sama funkcja falowa, dokłada się tylko do ogólnego zamieszania (co wobec rozwoju wydarzeń było jednak do przewidzenia).

Teraz jednak musimy zadać sobie pytanie: *kto* jest tym obserwatorem? Wróćmy do scenariusza, który rozważaliśmy już kilka razy, z Alicją dokonującą pomiaru w laboratorium i spóźnialskim Bobem na korytarzu. Wprowadzę drobną modyfikację. Zastąpię Boba

słynnym teoretykiem, Eugene'em Wignerem. Alicja i Wigner są bliskimi przyjaciółmi[203].

Pamiętamy, że Alicja dokonuje pomiaru na układzie kwantowym zawierającym zbiór cząstek A przygotowanych w superpozycji stanów ↑ i ↓. Zamiast miernika urządzenie pomiarowe podłączone jest teraz do prostego przełącznika światła. Kiedy urządzenie rejestruje wynik ↑, przełącznik pozostaje w pozycji wyłączonej i światło się nie zapala (🔔). Jeśli urządzenie rejestruje stan ↓, przełącznik zmienia pozycję i zapala się światło (🚨). Alicja przeprowadza eksperyment jeden raz i widzi zapalone światło.

Wigner nadal jest na korytarzu. Z jego punktu widzenia całkowita funkcja falowa, na której Alicja właśnie przeprowadziła eksperyment, ma formę kolejnej superpozycji, obejmującej wyniki eksperymentu $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$, dwa możliwe stany przełącznika światła, (🔔) i (🚨), oraz dwa możliwe stany mózgu Alicji, (🧠) i (🧠):

Wigner wchodzi do laboratorium. Wywiązuje się rozmowa.

„Czy widziałaś zapalone światło?" – pyta Wigner.

„Tak" – odpowiada Alicja.

Z punktu widzenia Wignera doszło właśnie do zarejestrowania wyniku pomiaru przez jego świadomy umysł i funkcja falowa przechodzi kolaps do stanu opisywanego jako $A_{\downarrow}$(🚨🧠).

Po chwili namysłu postanawia jednak zadać przyjaciółce jeszcze jedno pytanie.

„Zanim cię zapytałem, co czułaś w związku z tym zapalonym światłem?"

Co zrozumiałe, Alicja zaczyna być lekko wzburzona.

„Powiedziałam ci już, *zobaczyłam* światło" – odpowiada poirytowanym tonem.

Nie chcąc narażać na szwank dobrych relacji, jakie ma z Alicją, Wigner postanawia przyjąć do wiadomości to, co usłyszał. Dochodzi do wniosku, że funkcja falowa musiała już przejść kolaps do stanu

$A_{\downarrow}$( ), *zanim* wszedł do laboratorium i zadał pytanie, zatem powyższa superpozycja, którą uważał za poprawną, jest w istocie błędna. Superpozycja ta „wydaje się absurdalna, ponieważ wynika z niej, że przed udzieleniem odpowiedzi na pytanie moja przyjaciółka była w stanie zawieszenia czynności życiowych”[204]. Napisał:

> Prowadzi to do konkluzji, że istota obdarzona świadomością musi odgrywać w mechanice kwantowej inną rolę niż nieożywiony przyrząd pomiarowy [...] Z punktu widzenia ortodoksyjnej mechaniki kwantowej wcale nie należy dostrzegać w tym sprzeczności i nie ma jej, gdy jesteśmy przekonani, że alternatywa jest bez znaczenia, obojętne, czy świadomość mojego przyjaciela zawiera wrażenie związane z zobaczeniem światła, czy wrażenie związane z niezobaczeniem światła. Jednakże negowanie do tego stopnia istnienia świadomości u przyjaciela z pewnością jest dalece nienaturalne, zbliża się do solipsyzmu, i tylko niewielu ludzi w głębi duszy zgodzi się z takim postawieniem sprawy.

To *paradoks przyjaciela Wignera*. Chcąc go rozwiązać, musimy założyć, że nieodwracalny kolaps funkcji falowej jest wyzwalany przez *pierwszy* świadomy umysł, który ją napotka.

Jest coś jeszcze. Nigdzie w świecie fizycznym nie jest możliwe wywarcie fizycznego oddziaływania na jakieś ciało bez zaistnienia pewnej reakcji. To trzecia zasada dynamiki Newtona. Czy świadomość miałaby działać inaczej? Wywołujące kolaps funkcji falowej oddziaływanie świadomego umysłu, choć mizerne, to jednak wytwarza natychmiastową reakcję – wiedza na temat stanu układu jest nieodwracalnie (i trwale) wytworzona w umyśle obserwatora. Reakcja ta może prowadzić do innych fizycznych skutków, takich jak zapisanie wyniku w notatniku laboratoryjnym albo publikacja artykułu naukowego, może zdobycie Nagrody Nobla. W tej hipotezie wpływ materii na umysł równoważony jest przez wpływ umysłu na materię.

Jeżeli wprowadzimy do naszego odwzorowania mechaniki kwantowej jakąś rolę świadomości, wówczas musimy przyjąć do

wiadomości jedno z ulubionych powiedzonek Wheelera. Twierdził on, parafrazując Bohra, że „żadne elementarne zjawisko nie jest zjawiskiem, dopóki nie jest zjawiskiem zarejestrowanym (zaobserwowanym)”[205]. Zamiast interpretować ten proces rejestracji po prostu jako nieodwracalną zmianę stanu naszej wiedzy na temat układu, Wheeler skłaniał się ku bardziej realistycznej interpretacji, w której proces jest w zasadzie nieodwracalnym aktem stworzenia. „Niezaprzeczalnie jesteśmy zaangażowani w wywoływanie tego, co, jak się zdaje, zachodzi”[206].

Wheeler dołożył starań, aby oddzielić pojęcie „zjawiska kwantowego” od świadomości, twierdząc, że zjawisko wywoływane jest przez fizyczny, nieodwracalny akt wzmocnienia. W jego sformułowaniu znajduje się jednak słowo „zaobserwowane”, a jeśli zaakceptujemy rolę świadomej obserwacji w fizyce kwantowej, to dochodzimy mniej więcej do tych samych wniosków. Skoro świadomość jest konieczna, aby doszło do kolapsu funkcji falowej i „zmieniło ją w coś rzeczywistego”, wówczas zapewne stan kwantowy, któremu odpowiada, nie istnieje dopóty, dopóki nie stanie się częścią świadomego doznania obserwatora. Stąd już tylko nieduży krok do odrzucenia Pierwszego Sądu Logicznego. *Nic* nie istnieje dopóty, dopóki nie zostanie zarejestrowane przez świadomość.

W istocie w 1977 roku Wheeler opracował szczegółowo coś, co stało się znane jako „partycypacyjna zasada antropiczna”:

> Nic nie przemawia głośniej za tą tezą niż [...] antropiczna zasada [Brandona] Cartera i [Roberta] Dicke’a oraz [...] nieodzowność udziału partycypującego obserwatora – co zostało udokumentowane w mechanice kwantowej – w określeniu jakiegokolwiek użytecznego pojęcia rzeczywistości. Nic w bardziej oczywisty sposób nie spaja tych rozważań w większą całość niż teza mówiąca o „genezie z pozycji obserwatora”[207].

Przymiotnik „antropiczny” oznacza „odnoszący się do ludzkości lub ludzi”. Choć Wheeler oświadczył później, że „oko” obserwatora

„równie dobrze mogłoby być kawałkiem miki”[208], to jednak praktycznie nie da się odczytać jego eseju z 1977 roku inaczej niż jako opowieść o „nas”, istotach partycypujących w wydarzeniach zachodzących we Wszechświecie, który stwarzamy przez prowadzone obserwacje. John Barrow i Frank Tipler w swym obszernym omówieniu argumentacji antropicznej, zawartym w książce zatytułowanej *The Anthropic Cosmological Principle*, stwierdzili, że stanowisko Wheelera jest spójne z wersją postulatu, który nazwali silną zasadą antropiczną: „*Obserwatorzy są konieczni, aby Wszechświat mógł zaistnieć*”[209].

W porządku. Przy okazji tej wizyty na brzegach Rzeczywistości Metafizycznej wygodnie zapadliśmy w rozstawiony na plaży leżak, delektując się promieniami słońca na skórze, widokiem nieba zza przyciemnionych okularów i smakiem zimnej margarity. Trochę tu zabawimy. Może logika jest klarowna, ale tak naprawdę próbujemy teraz rozwikłać dwie bardzo głęboko zakorzenione zagadki filozoficzne – po prostu łącząc je ze sobą. Muszę powiedzieć, że nigdy nie przemawiało to do mnie jako szczególnie wydajny sposób postępowania.

Dorzucając do mieszanki świadomość, otworzyliśmy szeroko drzwi dla okropnie dużej grupy kolejnych trudnych kwestii. Czym jest świadomość i jak działa? Co mamy na myśli, gdy mówimy, że świadomość nie jest „mechanistyczna”, i jakie mamy na to dowody? Jakim sposobem świadomość może rzekomo wyzwalać kolaps funkcji falowej? Czy kolaps funkcji falowej jest w rzeczywistości *odpowiedzialny* za świadomość? Czy umysł jest komputerem kwantowym?

Pytania te niewątpliwie skłaniają do refleksji, ale nie spodziewajmy się znaleźć za wiele odpowiedzi. Badania nad świadomością są jedyną dyscypliną spośród wielu, z jakimi się zetknąłem, która zasadniczo zbudowana jest na *problemach*. Mamy „trudny problem” świadomości, problem „umysł–ciało”, problem „innych umysłów” i wiele, wiele innych. Problemy te stanowiły punkt wyjścia do wielu filozoficznych wywodów i na papier przelano mnóstwo słów, ale – na razie – zdaje się, że nie osiągnięto zgody w zakresie rozwiązań.

Znaleźliśmy się w dość osobliwej sytuacji. Świadomość to coś głęboko osobistego. Wiemy, jak odczuwa się świadome doznania świata zewnętrznego, i mamy coś, co mógłbym nazwać wewnętrznym życiem duchowym. Nachodzą nas myśli i myślimy o tych myślach. Wiemy, czym *jest* nasza własna świadomość, albo przynajmniej wiemy, jak ją odczuwamy. W czym więc problem?

W poszukiwaniu odpowiedzi na to pytanie pomocne będzie prześledzenie fizycznych procesów związanych ze świadomym postrzeganiem czerwonej róży. Róże są czerwone, ponieważ ich płatki zawierają subtelną mieszaninę związków chemicznych nazywanych antocyjanami; nasycenie czerwonej barwy się zwiększa, gdy kwiat rośnie na umiarkowanie kwaśnej glebie. Antocyjany w płatkach róży oddziałują ze światłem słonecznym, pochłaniając światło o określonej długości fali i odbijając głównie światło czerwone, promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali z przedziału od 620 do 750 miliardowych części metra, umiejscowione na długofalowym skraju widma światła widzialnego, wciśnięte między promieniowanie barwy pomarańczowej a podczerwień. Oczywiście, światło składa się z fotonów, ale bez względu na to, jak bardzo będziemy wytężali wzrok, nie znajdziemy u fotonów z tego zakresu długości fali wewnętrznej własności odpowiedzialnej za „czerwoność". Poza różnicą długości fali (co jest równoważne z różnicą w energii, zgodnie ze wzorem Plancka–Einsteina) żadne fizyczne własności fotonów nie pozwalają na rozróżnienie koloru czerwonego od zielonego albo jakiegokolwiek innego koloru.

Idźmy dalej. Możemy prześledzić zmiany chemiczne i fizyczne, które są wynikiem zachodzących zjawisk, od oddziaływania fotonów z czopkami – komórkami receptorowymi w siatkówce oka – do stymulacji kory wzrokowej z tyłu naszej głowy. Można szukać wszędzie, ale nigdzie w tych zmianach chemicznych i fizycznych nie znajdziemy *doznania* koloru czerwonego. W sposób oczywisty dopiero gdy informacja ta zostanie jakoś zsyntetyzowana przez korę wzrokową, świadome doznanie pięknej, czerwonej róży staje się naszym udziałem.

Jak miałoby to działać? To właśnie trudny problem, jak tłumaczy filozof i kognitywista David Chalmers:

> Naprawdę trudny problem świadomości jest problemem dotyczącym *doznania* [...] Kiedy widzimy, doznajemy wrażeń wzrokowych: odbieramy właściwość czerwieni, doświadczamy jasnych i ciemnych odcieni, głębi pola widzenia. Inne doznania współgrają z percepcją odmiennych funkcji: dźwiękiem klarnetu, zapachem kulek naftaliny. Są jeszcze doznania cielesne, od bólu po orgazm, są też obrazy w wyobraźni, które są wywoływane wewnętrznie, jest odczucie ruchu i doświadczanie strumienia świadomych myśli. Wszystkie te stany spaja poczucie, że to my się w nich znajdujemy. Wszystko to są stany doznania[210].

Problem jest trudny dlatego, że nie tylko umyka nam wyjaśnienie z punktu widzenia fizyki, jak miałoby się to dziać, ale nie wiemy nawet, jak poprawnie problem sformułować.

Dobrze. Jeżeli odpowiedź na pytanie „jak" stanowi zbyt poważny problem, to może uda nam się przynajmniej znaleźć jakieś wskazówki dzięki rozważaniu, *gdzie* te doznania mogą się wydarzać?

Francuski filozof Kartezjusz słusznie uważany jest za ojca nowoczesnej filozofii. W swoim traktacie *Rozprawa o metodzie*, opublikowanym po raz pierwszy w 1637 roku, zapoczątkował całkiem nową tradycję filozoficzną, w której nie może być wątpliwości w stosunku do absolutnej słuszności formułowanych przez nią wniosków. Z prawdy absolutnej, twierdził, czerpiemy wiedzę, co do której mamy pewność. Czuł jednak, że w celu dotarcia do prawdy absolutnej nie ma innego wyjścia i konieczne jest odrzucenie wszystkiego, co budzi nawet najmniejsze wątpliwości. Oznaczało to odrzucenie wszelkich informacji o świecie, zebranych za pomocą zmysłów.

Dlaczego? Cóż, po pierwsze, filozof nie mógł całkowicie wykluczyć możliwości, że od czasu do czasu zmysły go oszukują, na przykład gdy doświadcza iluzji optycznych albo trików i manipulacji umysłem w sztuczkach magicznych[211]. Po drugie, nie mógł mieć pewności, że

jego spostrzeżenia i doznania nie są częścią jakiegoś skomplikowanego snu. Na koniec nie mógł być pewny, że nie padł ofiarą jakiegoś złośliwego demona lub nikczemnego geniusza, zdolnego manipulować bodźcami zmysłowymi w celu stworzenia całkowicie fałszywego wrażenia otaczającego go świata (zupełnie jak robiły to maszyny w filmie *Matrix*).

Kartezjusz czuł, że przynajmniej jednej rzeczy może być pewny. Mógł być pewny tego, że jest istotą obdarzoną świadomym umysłem, istotą, która myśli. Twierdził, że byłoby sprzecznością, gdyby – będąc istotą myślącą – utrzymywał, iż nie istnieje. Wobec tego jego własne istnienie również było czymś, czego mógł być pewny. Wysnuł wniosek: *cogito ergo sum*. Myślę, więc jestem.

Zewnętrzny świat fizyczny jest niewyraźny i niepewny, może nie wyglądać na taki, jaki jest naprawdę. Tymczasem świadomy umysł wydaje się całkowicie odmienny. Kartezjusz poszedł w swych wnioskach dalej i uznał, że musi to oznaczać, iż świadomy umysł jest odrębny i różny od świata fizycznego i wszystkiego, co w nim się znajduje, włącznie z bezmyślną maszynerią jego ciała i mózgu. Świadomość musi być czymś „innym", czymś niefizycznym.

Ten dualizm umysł–ciało (czasami nazywany dualizmem kartezjańskim) jest w pełni spójny z wiarą w duszę lub ducha. Ciało jest ledwie skorupą albo wehikułem czy też mechanicznym sprzętem wykorzystywanym do uzyskiwania ekspresji zewnętrznej i będącym rozszerzeniem niefizycznej substancji myślącej. Naturalnie, wydaje się jasne, że ten rodzaj dualizmu jest właśnie tym, co von Neumann i Wigner mieli na myśli, gdy utożsamiali świadomość z miejscem (składnik **III**), w którym już nie znajduje zastosowania fizyczny mechanizm, które pozostaje *poza* rachunkiem i dlatego jest idealny do realizacji kolapsu funkcji falowej.

Jednak wyprowadzenie z tego wniosku, że świadomy umysł musi być niefizyczny, wymaga raczej śmiałej woltyżerki logicznej, którą wielu współczesnych filozofów i neurobiologów uważa za nie do wybronienia. Kłopot polega na tym, że odłączając umysł od mózgu i nadając mu charakter niefizyczny, wypychamy go poza granice zasięgu nauki i sprawiamy, że jest całkowicie niedostępny. Nauka po prostu nie może nim się zajmować. W opublikowanej po raz pierwszy

w 1949 roku książce *Czym jest umysł?* filozof Gilbert Ryle wyraził się pogardliwie o kartezjańskim dualizmie umysł–ciało, określając go mianem „ducha w maszynie”[212]. W wydanej w 1991 roku książce *Consciousness Explained* filozof Daniel Dennett stwierdził, że „akceptacja dualizmu jest jednoznaczna z aktem kapitulacji”[213].

W obliczu tego impasu jedynym sposobem na zrobienie kroku naprzód jest poczynienie pewnych założeń. Zakładamy więc, że jakkolwiek to działa, świadomość powstaje jako bezpośredni skutek neuronowych procesów chemicznych i fizycznych, jakie zachodzą w mózgu. Doznanie czerwonej róży ma *korelację neuronową* – odpowiada wytworzeniu szczególnego zbioru stanów chemicznych i fizycznych z udziałem odrębnego zestawu neuronów, umiejscowionych w różnych częściach mózgu. W ujęciu filozoficznym poglądy te znane są jako „materializm”.

Neurobiolodzy mają dostęp do potężnych technologii, takich jak funkcjonalne obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego (fMRI) i pozytonowa tomografia emisyjna (PET), które w nieinwazyjny sposób potrafią niezwykle szczegółowo obrazować działanie mózgu. Doznania albo myśli stymulują tą lub inną część mózgu. Kiedy części te podejmują pracę, pobierają z krwiobiegu glukozę i tlen. Skan fMRI pokazuje, gdzie koncentruje się tlen, czyli które partie mózgu „rozświetlają się” wskutek jakichś bodźców zmysłowych, procesów myślowych, reakcji emocjonalnej lub dostępu do zasobów pamięci. Skan PET wykorzystuje promieniotwórcze markery w krwiobiegu, ale oprócz tej różnicy działa tak samo, aczkolwiek w mniejszej rozdzielczości.

W swej nowoczesnej formie neurobiologia została ukształtowana zaledwie w drugiej połowie minionego stulecia. W stosunkowo krótkim czasie zrozumieliśmy ogromnie dużo, ale po raz kolejny musimy przyznać, że choć badania mózgu ujawniały coraz więcej i więcej materialistycznych mechanizmów, to jednak „trudny problem” nadal pozostaje nierozwiązany.

Niektórzy neurobiolodzy są mimo to przekonani, że świadomość można znaleźć w zdarzeniach o naturze chemicznej i neurofizjologicznej, że świadomość nie jest „czymś”, ale raczej

emergentną konsekwencją złożonego zbioru procesów zachodzących w rozwiniętym mózgu[214].

Umiejscowienie świadomości w aktywności neuronów prowadzi do wniosku, że nie może ona być przypisywana wyłącznie istotom ludzkim. W lipcu 2012 roku na Uniwersytecie Cambridge w Anglii doszło do międzynarodowej konferencji z udziałem grupy wybitnych badaczy zajmujących się neurobiologią, neurofarmakologią, neurofizjologią, neuroanatomią i neurobiologią obliczeniową. Po dyskusjach uzgodnili poświęconą świadomości Deklarację z Cambridge, w której zapisano:

> ciężar dowodów wskazuje, że ludzie nie są jedynymi istotami mającymi neurologiczne substraty, które generują świadomość. Te neurologiczne substraty mają też zwierzęta, w tym wszystkie ssaki i ptaki, jak również wiele innych stworzeń, z ośmiornicami włącznie[215].

Czy koty mają świadomość? Deklaracja z Cambridge sugeruje, że mają. Kotu Schrödingera ponownie można byłoby oszczędzić nieprzyjemności pozostawania żywym i martwym jednocześnie, jego los bowiem już został przypieczętowany (przez jego świadomość), zanim uniesiemy wieko pudełka i zerkniemy do środka. Do pewnego stopnia stanowi to rozwiązanie wyzwania Bella. Nie trzeba mieć doktoratu z fizyki, aby doprowadzić funkcję falową do kolapsu. Trzeba jednak mieć świadomość.

Zgodnie z szeroko akceptowanym konsensusem ludzki umysł jest wynikiem ewolucyjnej presji selekcyjnej, napędzanej u gatunku *Homo sapiens* przez pętle przyczynowo-skutkowe wytwarzane między rosnącą objętością sieci neuronowej, adaptacjami genetycznymi i zmianami anatomicznymi, promujące rozwój zdolności posługiwania się mową i tworzenie społeczności. To hipoteza *mózgu społecznego*. Według paleoantropologów „moment oświecenia” dla ludzi wypada pomiędzy 40 tysięcy a 50 tysięcy lat temu. To chwila *Wielkiego Skoku Naprzód* albo „ludzkiej rewolucji”, rozkwit innowacyjności i kreatywności człowieka, obejmujący przejście do czegoś, co jest znane jako *behawioralna nowoczesność*.

W tym „modelu standardowym” świadomość jest naturalną konsekwencją obecnych w ewolucji procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Główne własności wody (krzepnie w temperaturze 0°C, wrze w 100°C) są konsekwencją fizycznych własności kwarków górnych i dolnych, gluonów i elektronów, aczkolwiek niezwykle trudno byłoby nam przewidzieć to pierwsze na podstawie tego, co obecnie wiemy o drugim. Świadomość jest więc (do tej pory nieprzewidzianą i nieprzewidywalną) konsekwencją istnienia konwencjonalnej, materialnej zawartości Wszechświata, wyłaniającą się po połączeniu ze sobą miliardów neuronów i ukształtowaniu rozszerzonej sieci w mózgu, oraz w wyniku prowadzenia w tej sieci miliardów złożonych operacji obliczeniowych. Świadomość nie jest czymś, co „istniało przedtem”.

Co jednak, jeśli Wszechświat zawsze zawierał fizyczne zdarzenia, które, w pewnym sensie, są „atomami” świadomości istniejącej na długo przed biologią? Co, jeśli jedną z konsekwencji ewolucji jest gromadzenie tych „atomowych” zdarzeń, koordynowanie i łączenie ich w aktywności zachodzącej *w* neuronach wewnątrz mózgu, skutkującej tym, co utożsamiamy ze świadomością? Co, jeśli wspomniane zdarzenia związane są z wyraźnie *niepoddającym się obliczeniom* kolapsem funkcji falowej? Mamy wówczas coś, co Penrose i Stuart Hameroff, profesor anestezjologii na Uniwersytecie Arizony, nazywają *skoordynowaną obiektywną redukcją* albo teorią Orch-OR, będącą próbą ustanowienia kwantowych podstaw świadomości.

Pomysł pojawił się w latach dziewięćdziesiątych XX wieku i początkowo opracowywany był osobno przez Penrose’a i Hameroffa, zanim postanowili połączyć swoje wysiłki i rozpocząć współpracę. Nie ma nic zaskakującego w tym, że Penrose patrzył na problem z perspektywy matematyki. W swojej książce *Nowy umysł cesarza* przekonywał o fundamentalnej roli świadomości w rozumieniu przez ludzi prawd matematycznych, która znacznie wykraczała poza zdolność wykonywania obliczeń. „Musimy »widzieć«, iż dowód matematyczny jest prawdziwy, aby uwierzyć w jego poprawność – pisał. To »widzenie« jest istotą

świadomości”[216]. Pogląd ten jest całkowicie spójny ze stwierdzeniem von Neumanna, iż „świadomość pozostaje poza obliczeniami”.

W poprzednim rozdziale widzieliśmy już, że – w tej samej książce – Penrose przedstawiał argumenty przemawiające za udziałem w kolapsie funkcji falowej lokalnych zagęszczeń masy-energii i zakrzywienia czasoprzestrzeni, co później stało się znane jako teoria Diósiego–Penrose’a. Jednakże przekonawszy się, że świadomość stanowi sedno wyniku procesu, którego nie sposób objąć obliczeniami, i po zaproponowaniu też mechanizmu kolapsu funkcji falowej, nie był w stanie połączyć jednego z drugim. Brakowało mu fizycznego mechanizmu, który pozwalałby zdarzeniom kwantowym w jakiś sposób kierować aktywnością mózgu lub ją determinować, a więc wpływać na świadomość:

> Można jednak spekulować, iż gdzieś w głębi mózgu istnieją komórki czułe na pojedyncze kwanty. Jeśli okaże się, że tak jest w istocie, będzie to dowód, iż mechanika kwantowa odgrywa ważną rolę w działaniu mózgu[217].

Hameroff wiedział, gdzie szukać. Wspólnie z Richardem Wattem z Wydziału Inżynierii Elektrycznej Uniwersytetu Arizony sformułował w 1982 roku hipotezę na temat roli, jaką w przetwarzaniu informacji przez mózg odgrywa pewien szczególny rodzaj polimerów białkowych nazywanych *mikrotubulami*. Struktury te znajdują się wewnątrz złożonych systemów komórkowych, do których należą też neurony[218]. Samoorganizujące się polimery umożliwiają powstawanie połączeń synaptycznych między neuronami, pomagają podtrzymywać i regulować siły tych połączeń w realizacji funkcji poznawczych. Hameroff i Watt wysnuli teorię, zgodnie z którą składniki polimerów (kuliste białka nazywane *tubulinami*) przechodzą spójne wzbudzenia, tworzące wzory wspomagające przetwarzanie informacji w podobny sposób, jak robią to w komputerze tranzystory.

Obiegowy sąd na temat przetwarzania przez mózg informacji jest taki, że opiera się on na przełączaniu synaps. Na jeden neuron przypada średnio około 1000 synaps, z których każda ma zdolność wykonania 1000 operacji przełączania na sekundę. Przeciętnie mózg

człowieka zawiera około 100 miliardów neuronów, tak więc w ciągu sekundy może wykonać 10^{17} operacji obliczeniowych. Tylko że w każdej komórce znajduje się 10 *milionów* podjednostek tubulin, zdolnych przełączać się milion razy szybciej, co daje 10^{16} operacji na sekundę dla każdego neuronu. Jeśli przetwarzanie informacji rzeczywiście zachodzi w tym miejscu, sugerowałoby to przyrost liczby operacji na sekundę do poziomu 10^{27}, czyli *wzrost o dziesięć rzędów wielkości*.

Podjednostki tubuliny mają dwa różne płatki, każdy zbudowany z około 450 aminokwasów. Każda jednostka tubuliny może przyjąć co najmniej dwie różne „konformacje" – dwa różne układy przestrzenne jej atomów – charakteryzujące się nieco innym rozkładem gęstości elektronów, decydujących o słabych, długozasięgowych oddziaływaniach, zwanych siłami „van der Waalsa", które wymieniane są pomiędzy sąsiednimi jednostkami. Uważa się, że siły te odgrywają istotną rolę w umożliwianiu przełączania się między konformacjami, co stanowi podstawę działań obliczeniowych.

Od samego początku Hameroff był przekonany, że istnieje związek między mikrotubulami a świadomością, choćby z powodu skuteczności szerokiego wachlarza różnych środków znieczulających w czasowym zawieszaniu świadomości. W 1983 roku wspólnie z Wattem wysunął tezę, że chemiczne środki znieczulające przesączają się do neuronu, zakłócają wymianę sił van der Waalsa między podjednostkami tubulin i wyłączają działania obliczeniowe, co skutkuje u pacjenta stanem znieczulenia ogólnego.

Po przeczytaniu *Nowego umysłu cesarza* Hameroff skontaktował się z Penrose'em i obaj postanowili współpracować. W chwili gdy w 1994 roku w księgarniach pojawił się napisany przez Penrose'a sequel tej książki, *Shadows of the Mind*, teoria Orch-OR autorstwa Penrose'a–Hameroffa miała już ustaloną renomę.

Każda podjednostka tubulin ma wymiary 8 × 4 × 4 nanometry. Łączą się one w łańcuchy polimerowe, które tworzą kolumny, a 13 zwiniętych kolumn buduje pustą w środku rurkę – mikrotubulę. Te z kolei łączą się z siecią splatających się włókien; w ten sposób

powstaje struktura stanowiąca fizyczną podporę dla neuronów, nazywana cytoszkieletem.

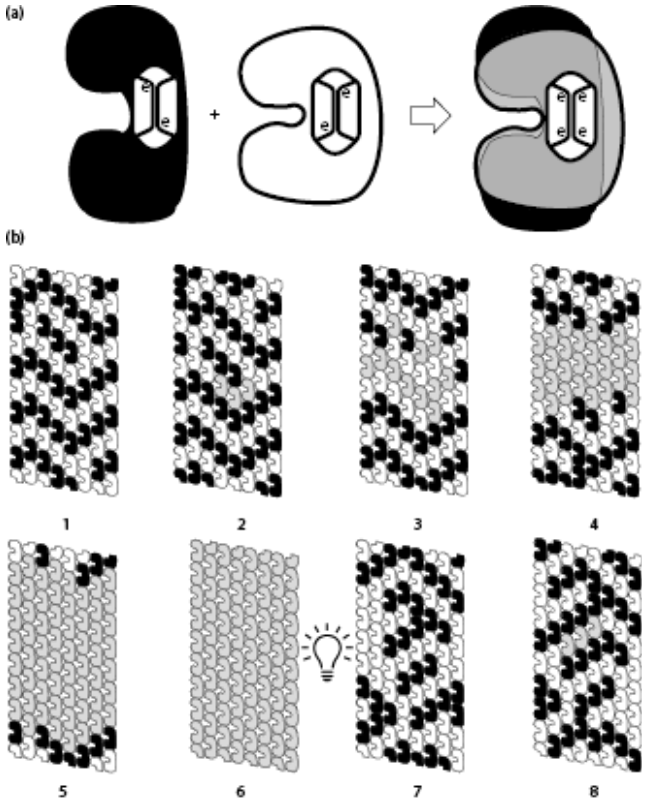
Mechanizm Orch-OR obejmuje powstawanie superpozycji kwantowych różnych konformacji tubulin, jak pokazano na rysunku 16a. Podjednostki oddziałują z sąsiednimi podjednostkami w sposób skoordynowany, umożliwiający rozwój wzdłuż tubuli poszerzonych, koherentnych superpozycji. Pokazano to w krokach 1–6 na rysunku 16b, gdzie dla jasności mikrotubule rozwinięto i wyprostowano. Superpozycje pojedynczej podjednostki zaprezentowano na tym rysunku jako elementy w kolorze szarym. W miarę rozbudowywania się poszerzonej superpozycji przechodzi ona próg określony przez lokalną gęstość masy (a więc też lokalną krzywiznę czasoprzestrzeni), zgodnie z teorią Diósiego–Penrose'a. Rozszerzona funkcja falowa doznaje kolapsu i podjednostki tubulin wracają do swoich klasycznych stanów. Według teorii Orch-OR to właśnie przejście między krokiem 6 a 7 jest miejscem, gdzie pojawia się świadomość (stąd żarówka). Następnie proces zaczyna się od nowa.

Ten w dużej mierze uproszczony opis mechanizmu nie oddaje w pełni jego natury. Myślę jednak, że powinniśmy odnieść wrażenie, iż wszystko to jest w dużym stopniu *oparte na domysłach*. Ma swoje źródło w fuzji pomysłów z pogranicza fizyki kwantowej i neurobiologii (jak też filozofii). Nie dziwi więc, że idea spotkała się z silną krytyką zarówno fizyków, jak i neurobiologów.

Zapewne najbardziej oczywista kwestia związana jest ze zrównoważoną rozbudową koherentnych superpozycji kwantowych na obszarze bardzo dużych struktur cząsteczek biologicznych. Jak przekonaliśmy się w rozdziale 8, w laboratorium udało się uzyskać superpozycje obejmujące struktury pośrednie między światem kwantowym a klasycznym, w tym cząsteczki pochodzenia organicznego, zawierające do 430 atomów. Choć należy przyznać, że nie wiemy jeszcze, jaka może być górna granica, to jednak widać już, że im większy układ, tym trudniej ochronić go przed skutkami środowiskowej dekoherencji. To główny powód tego, że MAQRO jest misją kosmiczną.

Każda podjednostka tubulin to wszakże struktura białkowa składająca się z ponad *dziesięciu tysięcy atomów*[219]. Długość

mikrotubulin waha się od około 200 do 25 tysięcy nanometrów. Oznacza to, że w przypadku krótszych mikrotubulin polimerowa kolumna składa się zaledwie z 25 podjednostek, a skoro mikrotubulę tworzy 13 kolumn, to łącznie cała struktura liczy 325 podjednostek. W takim razie mechanizm Orch-OR wymaga, aby koherentna superpozycja kwantowa rozciągała się na strukturę składającą się z 325 tysięcy atomów i utrzymywała się przez czas liczony w milisekundach, zanim ulegnie kolapsowi. Ostro kontrastuje to z sugerowaną przez misję MAQRO wielkością makroskopowych obiektów, którymi są małe „nanokulki" o średnicy około 100 nanometrów.



Rysunek 16. Teoria Orch-OR Penrose'a–Hameroffa opiera się na pomyśle, zgodnie z którym podjednostki tubulin w łańcuchach polimerowych, jakie tworzą mikrotubule wewnątrz neuronów, mogą wchodzić w superpozycję różnych stanów konformacji (a). Podjednostki oddziałują z sąsiednimi podjednostkami, co prowadzi do rozbudowywania się wzdłuż tubuli koherentnej superpozycji – pokazano to w części (b) jako kroki 1–6. Kiedy superpozycja osiąga krytyczną gęstość masy, funkcja falowa przechodzi kolaps (kroki 6 i 7), wnosząc wkład do świadomego doznania.

Wydaje się szalenie mało prawdopodobne, aby koherentna superpozycja kwantowa mogła być podtrzymywana w „ciepłym, wilgotnym i hałaśliwym" środowisku, typowym dla neuronów w pracującym mózgu. W 2000 roku teoretyk Max Tegmark stwierdził, że bardziej prawdopodobne jest, iż w środowisku tego typu czas dekoherencji będzie się wahał między 10^{-13} a 10^{-20} sekundy[220].

Mimo wszystko w duchu Czwartego Sądu Logicznego nigdy nie powinniśmy nie doceniać potęgi realistycznej interpretacji w kontekście inspirowania i wzbudzania zainteresowania. Teoria Orch-OR Penrose'a–Hameroffa, choć bardzo mocno oparta na domysłach, zawiera kilka elementów, które mogłyby zostać zbadane eksperymentalnie, oraz formułuje wiele możliwych do sprawdzenia przewidywań. W ostatnim uaktualnieniu teorii i przeglądzie jej stanu, datowanym na rok 2014, Hameroff i Penrose sprawdzają, jak do tej pory wypadło 20 przewidywań, sformułowanych przez nich w 1998 roku. Zyskali dużo wiary w swoją teorię po niedawnym odkryciu przez zespół badawczy pod kierunkiem Anirbana Bandyopadhyaya z National Institute of Material Sciences w Japonii procesów przetwarzania pamięci w pojedynczej mikrotubuli w mózgu[221]. Doszli do wniosku, że teoria radzi sobie całkiem nieźle, oferując „realny, naukowy opis, ukierunkowany na zrozumienie zjawiska świadomości"[222].

Rzecz jasna, jednym ze składników teorii, dla którego wciąż brak dowodu empirycznego, jest mechanizm OR Diósiego–Penrose'a. Obecnie jakakolwiek potencjalna rola niepoddającego się obliczeniom kolapsu funkcji falowej w funkcjonowaniu świadomości pozostaje zakopana w piaskach plaż Rzeczywistości Metafizycznej.

Nawet jeśli pewnego dnia zostaną znalezione dowody świadczące o związku mechaniki kwantowej ze świadomością, Chalmers twierdzi, że i tak nie rozwiąże to trudnego problemu: „co się tyczy objaśnienia doznań, procesy kwantowe jadą na jednym wózku z innymi propozycjami. Absolutnie nie da się odpowiedzieć na pytanie, *dlaczego* akurat te procesy powinny leżeć u podstaw tworzenia doznań"[223].

198 Miał tendencję do unikania określenia „funkcja falowa”, prawdopodobnie z powodu bliskich związków z mechaniką falową Schrödingera. Wolał myśleć o opisie układów kwantowych w kategoriach bardziej abstrakcyjnych „stanów funkcji” w matematycznej „przestrzeni Hilberta”. Z pewnymi modyfikacjami to właśnie tego opisu powszechnie naucza się dziś studentów.

199 John von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, op. cit., s. 420.

200 Ibidem, s. 421.

201 Leo Szilard, *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, „Zeitschrift für Physik” 1929, nr 53, s. 840–856 (NASA Technical Translation F-16723).

202 Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, Nowy Jork 1974, s. 480. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

203 Eugene Wigner współpracował z jeszcze jednym rodakiem. Wspólnie z Szilardem i Edwardem Tellerem stanowili część „węgierskiego spisku”, stojącego za nakłonieniem Einsteina do napisania 2 sierpnia 1939 roku do prezydenta Stanów Zjednoczonych Franklina D. Roosevelta listu, w którym uczony ostrzegał przed „nadzwyczaj potężnymi bombami nowego rodzaju”. Zob. Jim Baggott, *Atomic: The First War of Physics and the Secret History of the Atom Bomb 1939–49*, Icon Books, Londyn 2009, s. 18–19.

204 Eugene Wigner, *Remarks on the Mind-Body Question*, w: Irving J. Good (red.), *The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-Baked Ideas*, Heinemann, Londyn 1961, s. 284–302. Artykuł znalazł się później w: John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek (red.), op. cit., s. 168–181. Cytaty pojawiają się na stronach 176–178.

205 John Archibald Wheeler, *Law without Law*, w: John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek (red.), op. cit., s. 182–213. Cytat pojawia się na s. 184.

206 Ibidem, s. 185.

207 John Archibald Wheeler, *Genesis and Observership*, w: Robert E. Butts i Jaakko Hintikka (red.), *Foundational Problems in the Special Sciences*, D. Reidel, Dordrecht Holland 1977, s. 28. Wheeler odnosił się do wypowiedzi Roberta Dicke’a, w której ten drugi podkreślał rolę „precyzyjnego dostrojenia” praw i stałych fizycznych, koniecznego, jak się zdaje, aby we Wszechświecie mogło zaistnieć życie, oraz do rozwiniętej przez Brandona Cartera w 1974 roku zasady antropicznej, w oczywisty sposób przeciwstawiającej się zasadzie kopernikańskiej.

208 John Wheeler i Kenneth Ford, *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics*, W.W. Norton, Nowy Jork 1998, s. 338.

209 John D. Barrow i Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oksford 1986, s. 22. Kursywa w oryginale.

210 David J. Chalmers, *Facing up to the Problem of Consciousness*, „Journal of Consciousness Studies" 1995, nr 2, s. 200–219.

211 Neurobiolodzy Stephen Macknik i Susana Martinez-Conde omawiają cuda neurobiologicznej magii w zajmującej książce: *Brudne gierki twojego umysłu: poznaj magię kłamstwa i nie daj się nabić w butelkę*, przeł. Marcin Machnik, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2011.

212 Gilbert Ryle, *Czym jest umysł?* przeł. Witold Marciszewski, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970.

213 Daniel Dennett, *Consciousness Explained*, Penguin, Londyn 1991.

214 Nie wszyscy neurobiolodzy są tego zdania. Czytelnikom zainteresowanym klarownym i błyskotliwym wywodem podważającym słuszność podejścia redukcjonistycznego polecam książkę Raymonda Tallisa, *Aping Mankind: Neuromania, Darwinitis, and the Misrepresentation of Humanity*, Routledge Classics, Londyn 2016. Alternatywną argumentację „od ogółu do szczegółu" można znaleźć w: George Ellis, *How Can Physics Underlie the Mind: Top-Down Causation in the Human Context*, Springer-Verlag, Berlin 2016.

215 Deklaracja z Cambridge na temat świadomości, 7 lipca 2012 roku.

216 Roger Penrose, *Nowy umysł cesarza*, op. cit., s. 458.

217 Ibidem, s. 441.

218 Znaleziono je również w niektórych prostych komórkach prokariotycznych.

219 Przeprowadzone ostatnio symulacje komputerowe dynamiki tubulin z cząsteczek difosforanu guanozyny (GDP) obejmowały strukturę złożoną z 13 432 atomów, nie licząc 150 510 cząsteczek wody, które otaczały tę strukturę i „formowały solwat". Zob. Yeshitila Gebremichael, Jhih-Wei Chu i Gregory A. Voth, *Intrinsic Bending and Structural Rearrangement of Tubulin Dimer: Molecular Dynamics Simulations and Coarse-Grained Analysis*, „Biophysical Journal" 2008, nr 95, s. 2487–2499.

220 Max Tegmark, *The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes*, „Physical Review E" 2000, nr 61, s. 4194–4206. Zob. też: arXiv:quant-ph/9907009v2, 10 listopada 1999 roku.

221 Satyajit Sahu, Subrata Ghosh, Kazuto Hirata, Daisuke Fujita i Anirban Bandyopadhyay, *Multi-level Memory-Switching Properties of a Single Brain Microtubule*, „Applied Physics Letters" 2013, nr 102, s. 123701.

222 Stuart Hameroff i Roger Penrose, *Consciousness in the Universe: A Review of the 'Orch-OR' Theory*, „Physics of Life Reviews" 2014, nr 11, s. 70.

223 David J. Chalmers, op. cit., s. 200–219. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

ROZDZIAŁ 10

Mechanika kwantowa jest niekompletna

Ponieważ... dobrze, poddaję się!

Widok z Charybdy: Everett, światy równoległe i wieloświat

Z tytułu, jaki wybrałem dla tego ostatniego rozdziału, można wnosić, że nie jestem szczególnie zachwycony interpretacjami, które będziemy tu rozważać. Choć rzeczywiście tak jest, moim szczerym pragnieniem jest przedstawienie argumentów za i przeciw tym interpretacjom najlepiej, jak potrafię, aby każdy mógł sobie wyrobić własne zdanie. Po drodze wyjaśnię, jakie mam wobec nich zastrzeżenia.

Niezależnie od tego, co o nich sądzę, nigdy nie przestawało mnie zadziwiać, że jedno z najprostszych rozwiązań problemu kolapsu funkcji falowej prowadzi do najdziwniejszych wniosków w całej mechanice kwantowej, jeśli nie w całej fizyce. Rozwiązanie to zawiera na wstępie tezę, że absolutnie nie mamy dowodu na istnienie kolapsu, stwierdzenie wprowadzone przez von Neumanna jako postulat. Widzieliśmy układy kwantowe na różnych etapach koherencji i potrafimy tworzyć superpozycje obiektów, które znajdują się gdzieś między domeną kwantową a światem klasycznym, ale do dziś nigdy *nie widzieliśmy*, żeby układ przechodził kolaps, nigdy też nie widzieliśmy superpozycji dużych obiektów, takich jak koty. W każdej realistycznej interpretacji funkcji falowej pojęcie kolapsu nigdy nie jest niczym więcej jak przydatną sztuczką, pozwalającą

przenieść się z układu, który jesteśmy zobligowani opisywać jako superpozycję możliwych wyników pomiaru, do układu charakteryzowanego przez jeden konkretny wynik.

Jest jeszcze jeden powód, by kwestionować potrzebę mówienia o kolapsie, o którym napomknąłem w rozdziale 6. Ma on źródło w związku między teorią kwantową a czasoprzestrzenią opisywaną przez ogólną teorię względności Einsteina.

Einstein przedstawił ogólną teorię względności w serii wykładów wygłoszonych w Pruskiej Akademii Nauk w Berlinie, których triumfalna kulminacja wypadła 25 listopada 1915 roku. Zaledwie kilka miesięcy później informował Akademię, że jego nowa teoria grawitacji może wymagać wprowadzenia zmian: „teoria kwantowa powinna, jak się zdaje, modyfikować nie tylko elektrodynamikę Maxwella, lecz także nową teorię grawitacji”[224].

Pierwsze próby stworzenia kwantowej teorii grawitacji zostały poczynione w 1930 roku przez protegowanego Bohra, Léona Rosenfelda. Jak wyjaśniałem w rozdziale 5, można ruszyć do celu trzema różnymi „drogami”, z których jedna polega na kwantyzacji czasoprzestrzeni w ogólnej teorii względności i prowadzi do struktur takich jak pętlowa grawitacja kwantowa. Rezultatem jest teoria kwantowa pola grawitacyjnego, kwantowa teoria samej czasoprzestrzeni.

Napotykane na tej drodze trudności są ogromne. Mechanika kwantowa formułowana jest w rygorze narzucanym przez przyjęte z góry tło czasoprzestrzeni, pojmowanej mniej więcej w taki sam sposób jak przestrzeń absolutna i czas absolutny w klasycznej mechanice Newtona. Mechanika kwantowa jest „zależna od tła”. Tymczasem w ogólnej teorii względności czasoprzestrzeń ma charakter dynamiczny. Geometria czasoprzestrzeni jest zmienna: *wyłania się* jako skutek oddziaływań fizycznych z udziałem masy-energii. Ogólna teoria względności pozostaje „niezależna od tła”.

W jakiejkolwiek realistycznej interpretacji funkcji falowej te dwa różne sposoby wyobrażania sobie przestrzeni i czasu przyprawiają nas o prawdziwy ból głowy. W mechanice kwantowej rutynowo rozpatrujemy układ kwantowy, jakby znajdował się w pudełku, odizolowany od świata zewnętrznego, którego w imię prostoty

wolimy nie brać pod uwagę. Do wnętrza tego pudełka stosujemy równanie Schrödingera i rozciągnięta w przestrzeni funkcja falowa układu ewoluuje w czasie gładko, w sposób ciągły i nielokalny. To Aksjomat Piąty albo proces **2** von Neumanna. Zadowoleni przenosimy teraz uwagę na klasyczny przyrząd pomiarowy, który znajduje się w świecie na zewnątrz pudełka. Kiedy oddziałuje on z układem kwantowym, przypuszczamy, że dochodzi do kolapsu funkcji falowej, opisywanego przez proces **1**.

Jak zamierzamy zastosować tę logikę do kwantowej czasoprzestrzeni? Pomijając jakieś „upiorne", nielokalne efekty, możemy uważać, że układ kwantowy zawierający cząstkę materii lub zespół cząstek znajduje się mniej więcej „tutaj", w tym miejscu we Wszechświecie, a więc w środku pudełka. Pudełko jest jednoznacznie określone przez jego ściany, wyobrażone *w* czasoprzestrzeni. Jeśli jednak będziemy rozważać całość samej czasoprzestrzeni, takich ścian nie można sobie wyobrazić. Kwantowa teoria czasoprzestrzeni jest, poniekąd z definicji, kwantową teorią całego Wszechświata lub kwantową kosmologią.

W każdej realistycznej interpretacji funkcji falowej potrzeba powoływania się na osobny proces „pomiaru" wprowadza szalony bałagan, ponieważ nieodwołalnie pociąga za sobą konieczność przyjęcia opisu z perspektywy spoza układu poddawanego pomiarowi, a przecież, o ile nam wiadomo, na zewnątrz Wszechświata nic nie ma. Dylemat ten zainteresował Hugh Everetta III, absolwenta studiów inżynierskich na wydziale chemii, który potem najpierw wybrał kontynuację studiów na wydziale matematyki Uniwersytetu Princeton (gdzie poznawał teorię gier w zastosowaniach militarnych), aby w 1955 roku przenieść się na studia doktoranckie z fizyki, gdzie jego promotorem został John Wheeler. W 1957 roku w artykule opartym na rozprawie doktorskiej pisał tak:

> Nie ma oczywistego sposobu na zastosowanie konwencjonalnego sformułowania mechaniki kwantowej do układu, który nie podlega obserwacji z zewnątrz. Cały system

> interpretacyjny tego formalizmu opiera się na pojęciu zewnętrznej obserwacji[225].

Mając na uwadze problemy stwarzane przez kolaps i brak jakichkolwiek bezpośrednich dowodów na jego istnienie, dlaczego po prostu się go nie pozbyć? Wyjaśniłem już, że na przestrzeni wieków naukowcy wypracowali bardzo użyteczny nawyk eliminowania ze swoich teorii wszelkiego niepotrzebnego balastu i ozdobników, wprowadzanych zwykle po to, by zadośćuczynić pewnym metafizycznym prekoncepcjom, ale ostatecznie nieznajdujących oparcia w faktach empirycznych. Właśnie na taki krok zdecydował się Everett. W rozprawie doktorskiej, kierując się logiką von Neumanna, zgodnie z którą należało przyjąć założenie, iż proces **2** ma zastosowanie również do wielkoskalowych obiektów z fizyki klasycznej, przedstawił następującą, alternatywną interpretację:

> Aby móc przyjąć uniwersalną słuszność opisu kwantowego, *należy całkowicie odrzucić proces 1*. Można wówczas założyć ogólną słuszność czystej mechaniki falowej, bez udziału jakichkolwiek stwierdzeń opartych na statystyce, dla wszystkich układów fizycznych, w odniesieniu do układów z włączeniem obserwatorów i przyrządów pomiarowych. Procesy związane z przeprowadzaniem obserwacji będą opisywane całkowicie przez funkcję [falową] złożonego układu, w którego skład wchodzi obserwator i poddawany obserwacji układ, a funkcja ta zawsze podporządkowana jest równaniu falowemu [Schrödingera] (proces 2)[226].

Na pierwszy rzut oka sugestia ta wydaje się trochę nietrafiona. Jeśli rzeczywiście naszym doznaniem jest to, że wskazówki pokazują tylko jeden kierunek, a kot jest albo żywy, albo martwy, wówczas rezygnacja z kolapsu zdaje się krokiem w złym kierunku. Przecież musimy się zmierzyć z nieskończonym regresem Schrödingera, bezkresną złożonością superpozycji obejmujących przyrządy pomiarowe, koty i na koniec ludzkich obserwatorów.

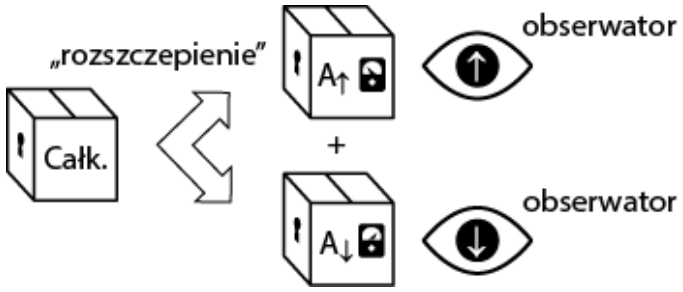
Tylko że, rzecz jasna, nigdy *nie doświadczamy* superpozycji obejmujących wielkoskalowe, klasyczne obiekty. Everett stwierdził,

że jedyny sposób obejścia tej sprzeczności polega na przyjęciu założenia, iż uzyskujemy *wszystkie* możliwe wyniki pomiaru.

Jak to możliwe? Jeszcze raz łatwiej prześledzić tok rozumowania Everetta na konkretnym przykładzie, tak więc po raz ostatni wróćmy do naszej kwantowej cząstki A, przygotowanej w superpozycji stanów spinu ↑ i ↓. Całkowita funkcja falowa napotyka urządzenie pomiarowe, a większy układ kwantowy ewoluuje gładko w superpozycję wyników $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$. Wywołuje to reakcję wskaźnika urządzenia pomiarowego, splątując wyniki ze „stanami wskazówki" miernika, co, jak przedtem, kończy się superpozycją stanów wynikowych $A_{\uparrow}$ i $A_{\downarrow}$. Jednak nie jest to już rodzaj superpozycji, jakie omawialiśmy do tej pory. W swojej rozprawie doktorskiej Everett napisał:

> Podczas gdy przed obserwacją mieliśmy pojedynczy stan obserwatora, po niej jest to kilka różnych stanów obserwatora, z których wszystkie znajdują się w superpozycji. Każdy z tych odrębnych stanów jest stanem obserwatora, możemy więc mówić o różnych obserwatorach, opisywanych przez różne stany. Równocześnie chodzi o jeden i ten sam układ fizyczny, toteż z tego punktu widzenia jest to *ten sam* obserwator, znajdujący się w różnych stanach dla różnych elementów superpozycji (tzn. ma on różne doznania w odrębnych elementach superpozycji)[227].

Everett nie proponował, by obserwator wchodził w jakiś rodzaj świadomej superpozycji, w której oba wyniki są doświadczane jednocześnie, lecz raczej chodziło mu o to, że obserwator „rozszczepia się" pomiędzy różnymi stanami. W naszym przykładzie jeden z tych stanów obserwatora odpowiada doznaniu $A_{\uparrow}$, a drugi doznaniu $A_{\downarrow}$:



Everett nie wypowiedział się jasno na temat natury ani przyczyny tego „rozszczepienia", ale w jego notatkach jest dowód na to, że interpretował je w dość dosłowny sposób jako zjawisko fizyczne oddziałujące na rzeczywistą funkcję falową (albo przez nią umożliwiane). Wheeler zachowywał znacznie większą ostrożność, opatrując jeden z rękopisów Everetta komentarzem: „Rozszczepienie? Potrzebne lepsze określenie". Radził Everettowi zawrzeć argumentację w innych słowach, aby uniknąć „dokonywania mistycznych, błędnych interpretacji przez zbyt wielu przygodnych, niezorientowanych w temacie czytelników"[228].

Tak wygląda interpretacja „stanów względnych" Everetta, w której słowo „względny" ma związek z korelacjami ustanawianymi pomiędzy składnikami superpozycji w całkowitej funkcji falowej i różnymi doznaniami obserwatora po rozszczepieniu. Jeden stan obserwatora odpowiada $A_{\uparrow}$, a drugi $A_{\downarrow}$, *względem* pierwszego. Everett twierdził, że prawdopodobieństwo kwantowe w takim wypadku nie jest niczym więcej jak *subiektywnym* prawdopodobieństwem narzucanym przez obserwatora, który w serii obserwacji przeprowadzanych na identycznie przygotowanych cząstkach A zauważa, że wyniki są losowe, z równymi, czyli wynoszącymi 50:50, szansami odnotowania ↑ lub ↓. Everett napisał: „Docieramy zatem do nowej sytuacji, w której formalna teoria jest obiektywnie ciągła i przyczynowa, będąc jednocześnie subiektywnie nieciągła i probabilistyczna"[229].

Mimo pewnych obaw związanych ze stosowanym przez Everetta słownictwem Wheeler przesłał kopię rozprawy Bohrowi i później odwiedził go w Kopenhadze w nadziei na zdobycie poparcia dla pracy, którą oceniał jako obiecujące podejście. Jego starania

osiągnęły punkt kulminacyjny w marcu 1959 roku wraz z przyjazdem do Danii samego Everetta. Wszystko na próżno. Bohr, zawsze mocno zwracający uwagę na właściwe sformułowania w opisach zjawisk fizycznych, nie miał ochoty nawet na omawianie „żadnej nowej (dziwnej) teorii jakiegoś dorobkiewicza”[230]. Podejście Everetta podważało zbyt wiele elementów ortodoksyjnej wizji kopenhaskiej, takich jak komplementarność fal i cząstek oraz interpretacja prawdopodobieństwa kwantowego. Szkoła kopenhaska z miejsca odrzucała jakiekolwiek sugestie mówiące o tym, że mechanika kwantowa może być stosowana do obiektów klasycznych.

Everett był skonsternowany. Od dwóch i pół roku pracował już w Pentagonie, w Grupie Oceniającej Systemy Uzbrojenia, i odrzucał podejmowane przez Wheelera próby ściągnięcia go z powrotem na uczelnię. W 1962 roku zaproszono go na konferencję, na której przedstawił swoją interpretację stanów względnych, jednak w tamtym czasie społeczność fizyków niemal całkowicie zignorowała jego pomysły.

Z jednym godnym uwagi wyjątkiem.

Bryce DeWitt zainteresował się analizą Everetta i w 1957 roku napisał do niego list zawierający długie opracowanie krytyczne. Jeżeli stan obserwatora rozszczepia się za każdym razem, gdy dokonywana jest obserwacja, to dlaczego – dociekał DeWitt – obserwator nie jest tego świadomy? W odpowiedzi Everett przywołał pewną analogię. Nie mamy powodu, aby podważać formułowane przez astronomię i fizykę klasyczną wnioski, które mówią nam, że Ziemia obraca się wokół własnej osi i krąży wokół Słońca. Tymczasem za sprawą naszej własnej bezwładności nie odczuwamy tego ruchu. Podobnie obserwator zachowuje wrażenie pojedynczej tożsamości i jednej historii, która może być zrekonstruowana we wspomnieniach, będąc nieświadomy istnienia wielu jego lub jej wersji, z których każda ma inne wspomnienia dotyczące sekwencji zdarzeń. Everett wtrącił ten argument w postaci przypisu w korekcie swojego artykułu z 1957 roku.

DeWitt dał się przekonać. Nie mógł dojść do ładu z kosmologią kwantową, wyraźnie niewspółgrającą z formalizmem, który, jak się zdawało, kładł zbyt silny akcent na „pomiar” z zewnątrz, zatem

w artykule opublikowanym we wrześniu 1970 roku w „Physics Today” podjął próbę poprawienia wizerunku interpretacji Everetta. Bohr zmarł w 1962 roku i można było dostrzec oznaki tego, że siła oddziaływania interpretacji kopenhaskiej zaczyna słabnąć. Być może DeWitt ocenił, iż skończył się czas owijania w bawełnę politycznie poprawnym językiem, i zdecydował się opisać interpretację słowami, których stara gwardia (łącznie z Wheelerem) nigdy by nie zaakceptowała.

Napisał: „Skupię się na jednej [interpretacji], która ukazuje świat jako twór nieustannie rozszczepiający się na mnogość wzajemnie niemożliwych do zaobserwowania, lecz jednakowo rzeczywistych światów, z których w każdym pomiar daje określony wynik”[231]. W taki sposób sformułowanie stanów względnych Everetta stało się *interpretacją wieloświatową* mechaniki kwantowej. Niemal z dnia na dzień interpretacja Everetta przemieniła się z jednej z najmniej znanych w jedną z najbardziej kontrowersyjnych.

Zdaje się, że Everett był zadowolony z dokonanego przez DeWitta doboru słów[232]. Kiedyś Wheeler zakomunikował mu, że choć „na ogół” wierzy w tę interpretację, to jednak w jeden wtorek każdego miesiąca wiary tej mu brakuje. Zastrzeżenia Wheelera były poważniejsze, niż mogłoby wynikać z anegdoty. W swoim czasie wycofał poparcie dla idei w takim stanie, w jakim funkcjonowała, przyznając później, że interpretacja „niesie ze sobą za dużo metafizycznego balastu” i wpędza „naukę w rodzaj mistycyzmu”[233]. Jednak nawet już po zdystansowaniu się docenił wkład Everetta jako jeden z najbardziej oryginalnych i najważniejszych na przestrzeni dekad[234].

DeWitt zdobył kopię oryginalnej rozprawy Everetta od jego żony Nancy. Z błogosławieństwem Everetta i pomocą jego studenta Neilla Grahama DeWitt opublikował ten materiał w 1973 roku, łącznie z artykułem Everetta z 1957 roku, sporządzoną przez Wheelera „oceną” tego artykułu, zamieszczoną pierwotnie w tym samym numerze pisma, własnym artykułem z „Physics Today” i kilkoma kolejnymi, wspomagającymi artykułami swoimi oraz autorstwa Grahama, a także Leona Coopera i Deborah van Vechten. Książka

jest zatytułowana *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*.

Kot Schrödingera nie jest już dłużej jednocześnie żywy i martwy w jednym i tym samym świecie, jest żywy w jednym świecie i martwy w drugim. W miarę powtarzania pomiarów liczba światów rozszczepiających się od siebie szybko rośnie. Akt pomiaru nie odgrywa szczególnej roli w interpretacji wieloświatowej, nie ma więc potrzeby, aby definiować pomiar jako odrębny proces, różniący się od *innych* procesów obejmujących superpozycję kwantową. Możemy przyjąć, że od Wielkiego Wybuchu, który jakieś 13,8 miliarda lat temu był początkiem Wszechświata, zaszło tych procesów bardzo dużo. Każdy z nich rozszczepiał świat na tyle gałęzi, ile składników miały różne superpozycje, jakie od tamtego momentu się uformowały.

W swoim artykule z „Physics Today" DeWitt oszacował, że do chwili obecnej musiało zaistnieć ponad 10^{100+} różnych gałęzi albo odrębnych światów. Każdy z tych światów zawiera „lekko niedoskonałe kopie samego siebie, rozszczepiające się na kolejne kopie, ostatecznie zmieniające go nie do poznania [...] Oto schizofrenia z nawiązką"[235].

Ponieważ interpretacja wieloświatowa zakłada *jedynie* ciągłą mechanikę opisywaną przez równanie Schrödingera i nic więcej, często reklamuje się ją jako spełniającą żądanie, aby mechanika kwantowa była postrzegana jako teoria kompletna. Jeśli rzeczywiście miałoby tak być, to źle wybraliśmy tytuł niniejszego rozdziału. Rzecz jasna, nie zgadzam się z tym. Teoria ta może być matematycznie kompletna (przemawia za tym więcej argumentów), lecz mimo to uważam, że osiąganie kompletności teorii przez przywołanie ogromnej mnogości wzajemnie niemożliwych do zaobserwowania, rzeczywistych światów jest raczej zbyt wysoką ceną, a na pewno nie znaczy tyle co „nic". Jak ktoś zauważył, interpretacja wieloświatowa jest „tania w zakresie założeń, ale kosztowna w odniesieniu do liczby wszechświatów"[236].

Statek Nauki dostał się pod wpływ silnych pasatów, które nieubłaganie spychają go ku Charybdzie, temu niebezpiecznemu wirowi metafizycznego nonsensu na temat natury rzeczywistości.

W kolejnych latach podejmowano wiele wysiłków ukierunkowanych na rehabilitację idei. Nie jest jasne, co rozszczepianie światów oznacza dla członów interferencyjnych w superpozycji, natomiast Dietera Zeha do rozwinięcia idei dekoherencji motywowała chęć zastąpienia pojęcia „wielu światów" pojęciem „multiświadomości" albo tym, co obecnie znane jest jako interpretacja „wielu umysłów"[237]. Rozszczepianie albo rozgałęzianie światów lub wszechświatów zastępowane jest rozszczepianiem lub rozgałęzianiem świadomości obserwatora. Obserwator nigdy nie jest świadomy istnienia superpozycji, ponieważ dekoherencja środowiskowa niszczy (albo poprawniej – tłumi) człony interferencyjne. Obserwator jest zawsze świadomy tylko jednego wyniku, ale mimo to inne wyniki istnieją w jego umyśle, aczkolwiek te alternatywne stany świadomości są niedostępne. W skrócie obserwator nie ma pojedynczego umysłu, lecz raczej mnogość (a nawet ciągłą nieskończoność) umysłów, każdy z wagą zależną od amplitudy funkcji falowej, toteż jeden jest dominujący.

Skromność miejsca uniemożliwia pogłębienie omówienia interpretacji wielu umysłów, której nazwę ukuli w 1988 roku filozofowie David Albert i Barry Loewer. Związek między problemem umysł–ciało i mechaniką kwantową niezależnie rozważał filozof Michael Lockwood w wydanej w 1989 roku książce *Mind, Brain & the Quantum: The Compound 'I'*[238]. Interpretacja wielu umysłów została zaprezentowana w popularnonaukowej książce Alberta *Quantum Mechanics and Experience*, wydanej po raz pierwszy w 1992 roku[239].

John Bell dostrzegł bliskie podobieństwo interpretacji wieloświatowej i teorii de Broglie'a–Bohma, stwierdzając, że oryginalna interpretacja Everetta może być racjonalizowana jako teoria fali pilotującej, ale bez torów cząstek. W tym sensie wynikające z interpretacji wieloświatowej rozszczepianie lub „rozgałęzianie" nie jest bardziej lub mniej ekstrawaganckim pomysłem niż „puste fale" w teorii de Broglie'a–Bohma. Podobnie jak Wheeler, Bell uważał nieskończone mnożenie światów za pomysł mocno przesadzony, twierdził, że nie służy ono żadnemu realnemu celowi i bez problemu można je wyeliminować. Nowym elementem, który został wprowadzony przez Bella, było „odrzucenie pojęcia

»przeszłości«”[240]. Zamiast mówić o rozgałęzianiu systemu światów w sposób, w jaki dzieje się to w przypadku korony drzewa, Bell zasugerował, że różne „historie” cząstki biegną równolegle, czasem zlewając się ze sobą, co prowadzi do wystąpienia efektów interferencji. Wyniki są więc determinowane przez sumowanie przeprowadzane na tych historiach, bez zauważalnego związku między jakąkolwiek konkretną teraźniejszością i jakąkolwiek szczególną przeszłością.

Ten „neoeverettowski” sposób rozumowania wciąga nas jednak w niekończący się spór dotyczący kompromisu pomiędzy różnymi prekoncepcjami metafizycznymi. Jeżeli osobiście wolicie trzymać się prostoty rzeczywistej funkcji falowej Wszechświata, której ruch jest w pełni opisany przez proces **2**, to musicie się zdecydować, czy z praktycznego punktu widzenia jesteście gotowi zaakceptować mnogość światów, definiowanych jako fizycznie realne lub po prostu „skuteczne”. Można tego uniknąć, uciekając się do teorii de Broglie’a–Bohma, wówczas jednak, jak się już przekonaliśmy, trzeba pogodzić się z nielokalnymi, upiornymi oddziaływaniami na odległość.

Zeh wprowadził do tej mieszanki dekoherencję jako środek służący wyostrzeniu związku między układami kwantowymi i klasycznymi. Bell mówił o zastąpieniu wielu światów wieloma „historiami” cząstek. Można więc wykonać stąd stosunkowo niewielki krok wstecz do interpretacji dekoherentnych historii, którą przedstawiłem w rozdziale 6. W opublikowanej w 1994 roku książce popularnonaukowej *Kwark i jaguar* Murray Gell-Mann objaśnił to następująco:

> Wierzymy, że praca Everetta jest użyteczna i ważna, ale wierzymy też, że jest jeszcze wiele do zrobienia. W niektórych przypadkach zamieszania przysporzył też dobór słów, dokonany przez niego i późniejszych komentatorów jego pracy. Na przykład jego interpretacja często opisywana jest w kategoriach „wielu światów”, podczas gdy wierzymy, że naprawdę miał na myśli „wiele alternatywnych historii wszechświata”. Co więcej, tych wiele światów opisywanych

> jest jako „wszystkie równe sobie”, tymczasem jesteśmy przekonani, że mniej mylące jest mówienie o „wielu historiach, traktowanych przez teorię jednakowo, z wyjątkiem ich różnych prawdopodobieństw”[241].

Wszystko świetnie, ale zauważmy, że ta zmiana perspektywy nie ogranicza się jedynie do reinterpretacji używanych przez nas słów. - Interpretacja wieloświatowa jest w sposób fundamentalny realistyczna – zakłada istnienie rzeczywistej funkcji falowej Wszechświata i mnogość rzeczywistych światów – podczas gdy, jak widzieliśmy w rozdziale 6, dekoherentne historie są z grubsza antyrealistyczne: sformułowanie „wszystkie jednakowo rzeczywiste” zostaje rozcieńczone do postaci „wszystkie jednakowo traktowane przez teorię”. Można odnieść wrażenie, że nie ma prostego wyjścia z tej sytuacji.

W tym właśnie sęk. Wielu fizyków teoretyków i filozofów, którzy opowiadają się za interpretacją wieloświatową albo mienią się „everettianami” lub „neoeverettianami”, niekoniecznie dało się przekonać do jednej i tej samej interpretacji lub pojedynczego zbioru metafizycznych prekoncepcji[242]. „Po 50 latach nie mamy dobrze określonego, ogólnie przyjętego zbioru założeń i postulatów, które łącznie składałyby się na »interpretację teorii kwantowej Everetta«” – napisał w 2010 roku Adrian Kent[243]. Może być tak, że zwolennicy interpretacji wieloświatowej zaufali własnej, zapewne unikatowej wizji, odpowiadającej temu, co tak naprawdę znaczy to dla nich samych. Jest to ważne w kontekście dalszego wywodu, mój krytycyzm bowiem ogranicza się do tych teoretyków i filozofów, którzy nie tylko zaakceptowali drzemiącego w nich metafizyka, lecz także zdecydowali się pójść na całość z metafizyką.

W maju 1977 roku DeWitt i Wheeler zaprosili Everetta do udziału w konferencji organizowanej na Uniwersytecie Teksańskim w Austin. Tematem konferencji były ludzka świadomość i generowana komputerowo sztuczna inteligencja, co zapewne odzwierciedlało rosnące zainteresowanie Wheelera rolą świadomości we wspomaganiu definiowania praw fizyki we „wszechświecie

partycypacyjnym". Everett wygłosił wykład omawiający nie tylko zagadnienie wielu światów, lecz także samouczenia się maszyn.

W trakcie przerwy obiadowej w restauracji z ogródkiem piwnym DeWitt tak zaaranżował spotkanie, że przy tym samym stoliku Everett usiadł z jednym z młodych doktorantów Wheelera. Podczas obiadu doktorant wypytywał Everetta o interpretację jego autorstwa, chciał bowiem wiedzieć, co on sam o niej myśli. Choć przebieg kariery odsunął Everetta daleko od kręgów akademickich i nie zagłębiał się on już w kwestie związane z interpretacją mechaniki kwantowej, jego wypowiedzi zrobiły na doktorancie wielkie wrażenie, gdyż znakomicie orientował się w aktualnym stanie dyskusji.

Doktorantem tym był David Deutsch.

Deutsch rozwinął własną, szczególną wersję interpretacji wieloświatowej. Według niego pomysł, iż do „rozgałęziania" Wszechświata dochodzi podczas każdego przejścia z udziałem superpozycji kwantowej, nie mógł być poprawny. Już prosty fakt, że możliwa jest interferencja zachodząca dla *pojedynczej cząstki*, mówi nam, iż rzeczywistość składa się z nieskończonej liczby *wszechświatów równoległych*, które tworzą coś, co obecnie powszechnie znane jest jako *wieloświat*.

Chcąc prześledzić rozumowanie Deutscha, wróćmy do opisu interferencji na dwóch szczelinach z udziałem elektronów z rozdziału 1, zwłaszcza do rysunku 4. Spójrzmy jeszcze raz na część 4a, gdzie można dostrzec jedynie kilka rozproszonych, jasnych plamek, wskazujących miejsce, w które „uderzył elektron". W rozdziale 1 wyjaśniłem, że efekt interferencji występujący dla pojedynczego elektronu zapewne pokazuje, iż każdy pojedynczy elektron zachowuje się jak fala – wyobrażony jako rzeczywista fala lub „formacja falowa" (cokolwiek to znaczy) – przechodząc jednocześnie przez obie szczeliny. Co jednak, jeśli elektrony zachowują integralność jako rzeczywiste, zlokalizowane cząstki, zdolne pokonać wyłącznie jedną lub drugą szczelinę? Deutsch twierdzi, że istnieje tylko jeden sposób, aby mimo to uzyskać wzór interferencyjny – każdemu elektronowi musi towarzyszyć gromada elektronów „cienia" lub elektronów „duchów", które przechodzą przez obie szczeliny i interferują z torem widzialnego elektronu.

Podczas gdy te elektrony „cienia” w oczywisty sposób wpływają na tor cząstki widzialnej, same pozostają niewykrywalne – nie wywołują żadnych innych zauważalnych skutków. Tłumaczy się to tym, że elektrony „cienia” nie istnieją w „naszym” Wszechświecie. Zamiast tego egzystują one w „ogromnej liczbie wszechświatów równoległych, w których obowiązują te same prawa fizyki, ale które różnią się tym, jakie jest w nich położenie cząstek”[244]. Kiedy obserwujemy interferencję zachodzącą dla pojedynczej cząstki, widzimy nie tyle interferencję kwantowej fali-cząstki samej ze sobą, ile dostrzegamy interferencję gromady cząstek z wszechświatów równoległych z cząstką znajdującą się w naszym własnym, namacalnym wszechświecie.

Według tej interpretacji „namacalny” wszechświat to po prostu ten, którego doświadczamy i który dobrze znamy. Nie jest uprzywilejowany ani wyjątkowy: nie ma żadnego „nadrzędnego wszechświata”. Właściwie to w tej mnogości wszechświatów istnieje mnogość „ciebie”, a każda z owych istot uważa swój świat za ten namacalny. Z powodu kwantowej natury rzeczywistości, leżącej u podstaw funkcjonowania tych różnych wszechświatów, każda z wersji „ciebie” ma różne doznania i różne historie lub wspomnienia zdarzeń. Jak objaśniał Deutsch: „Wielu z tych Davidów pisze w tej chwili poniższe słowa. Niektórym wychodzi lepiej. Inni poszli do kuchni zaparzyć herbatę”[245].

To dość duży ładunek informacji do przetworzenia, szczególnie gdy weźmiemy pod uwagę, że nie mamy żadnych dowodów empirycznych potwierdzających istnienie wszystkich tych równoległych wszechświatów. Deutsch twierdzi jednak, że interpretacja wieloświatowa jest jedynym sposobem, w jaki możemy wytłumaczyć niezwykły potencjał *komputerów kwantowych*.

Warto poświęcić temu zagadnieniu kilka zdań.

Procesory, które znajdują się w każdym komputerze stacjonarnym, laptopie, tablecie, smartfonie, smartwachu i zaawansowanych technologicznie akcesoriach, wykonują obliczenia na ciągach binarnej informacji nazywanych „bitami”, czyli na ciągach zer i jedynek. Klasyczne bity mają wartość „0” *lub* „1”. Zawsze przyjmują jedną lub drugą z tych wartości. Nie można dodawać ich do siebie, aby w jakiś

tajemniczy sposób utworzyć superpozycję 0 *i* 1. Jeśli jednak tworzymy bity z cząstek kwantowych, takich jak fotony lub elektrony, to osobliwe superpozycje 0 i 1 stają się całkowicie możliwe. Na przykład możemy przyporządkować wartość „0” stanowi o spinie ↑ oraz wartość „1” stanowi o spinie ↓. Takie „kwantowe bity” nazywamy „kubitami”. Ponieważ można tworzyć superpozycje kubitów, przetwarzanie informacji kwantowej przebiega zupełnie inaczej niż przetwarzanie informacji klasycznej.

Na układ bitów klasycznych może się składać tylko *jeden* „ciąg bitów” naraz, na przykład 01001101. Tymczasem układ kubitów może tworzyć superpozycje wszystkich możliwych kombinacji. Fizyczny stan superpozycji określany jest przez amplitudy funkcji falowych każdej kombinacji kubitów, z zastrzeżeniem, iż suma kwadratów tych amplitud jest równa 1 (pomiar może dać jeden i tylko jeden ciąg bitów).

I tu zaczyna się robić interesująco. Jeżeli zastosujemy proces obliczeniowy do klasycznego bitu, to wartość tego bitu może zmienić się z jednej możliwości w inną. Na przykład ciąg ośmiu bitów 01001101 może zmienić się w 01001001. Jednak zastosowanie procesu obliczeniowego do superpozycji kubitów zmienia *wszystkie* składowe superpozycji *jednocześnie*. Superpozycja na wejściu daje superpozycję na wyjściu.

W komputerze klasycznym obliczenia na danych wejściowych wykonywane są przez kilka tranzystorów, które włączają się lub wyłączają. Liniowe dane wejściowe dają nam liniowe informacje na wyjściu, a jeśli chcemy wykonywać więcej obliczeń w określonym przedziale czasu, musimy do wnętrza procesora zapakować więcej tranzystorów. Mieliśmy szczęście być świadkami niezwykłego wzrostu mocy obliczeniowej komputerów, jaki dokonał się w ciągu ostatnich 30 lat[246]. Procesor Intel 4004, wprowadzony na rynek w 1971 roku, na powierzchni 12 milimetrów kwadratowych mieścił 2300 tranzystorów. Procesor Apple 12 Bionic, instalowany w urządzeniach iPhone XS, XS Max i XR, które miały premierę na rynku we wrześniu 2018 roku, na powierzchni 83 milimetrów kwadratowych ma około

7 *miliardów* tranzystorów. Obecnie rekordowy wynik oscyluje wokół 20 do 30 miliardów tranzystorów, zależnie od typu układu scalonego.

To jednak nic w porównaniu z komputerem kwantowym, który ma spełnić obietnicę *wykładniczego* wzrostu liczby operacji wykonywanych w jednostce czasu.

Systemy szyfrowania, wykorzystywane w większości kanałów komunikacji i bankowości w Internecie, bazują na prostym fakcie, że znajdowanie czynników pierwszych dla bardzo dużych liczb całkowitych wymaga zastosowania ogromnej mocy obliczeniowej[247]. Na przykład oszacowano, że sieć miliona konwencjonalnych komputerów potrzebowałaby ponad miliona lat, aby znaleźć czynniki pierwsze liczby mającej 250 cyfr. Tymczasem to samo zadanie teoretycznie mógłby wykonać pojedynczy komputer kwantowy w czasie liczonym w minutach[248].

Deutsch twierdzi, że ten rodzaj zwiększenia mocy obliczeniowej jest możliwy tylko dzięki wykorzystaniu istnienia wieloświata. Jeżeli użycie komputera kwantowego do znalezienia czynników pewnej liczby wymaga 10^{500} razy większej mocy obliczeniowej niż fizycznie istniejące zasoby, to gdzie w takim razie odbywa się rozkład na czynniki?[249] Biorąc pod uwagę, że w widzialnym Wszechświecie znajduje się zaledwie około 10^{80} atomów, Deutsch podkreśla, że aby przeprowadzić obliczenia za pomocą komputera kwantowego, musimy sięgnąć po zasoby znajdujące się w mnogości wszechświatów równoległych.

Nie trzeba chyba mówić, że komputer kwantowy o takich możliwościach nie jest jeszcze dostępny. Jak już wspominałem, układy przygotowane w superpozycji kwantowej są niezwykle wrażliwe na dekoherencję środowiskową, a w komputerze kwantowym trzeba manipulować superpozycją bez jej niszczenia. Dekoherencja jest dozwolona dopiero w momencie ukończenia obliczeń. Do tej pory pomyślnie zademonstrowano komputer kwantowy operujący na stosunkowo małej liczbie kubitów[250]. Istnieje szansa, że komputer kwantowy, który mógłby zagrozić używanym obecnie systemom szyfrowania, powstanie za jakieś 20–30 lat.

Niezależnie od praktycznych zastosowań musimy odnieść się do głównego twierdzenia Deutscha – istnienie wieloświata jest *jedynym*

wytłumaczeniem podwyższonej szybkości działania komputera kwantowego.

Nikogo chyba nie zaskoczę, gdy powiem, że wraz z interpretacją wieloświatową do wieloświata Deutscha przenika więcej niż kilka problemów. Przede wszystkim chodzi o sposób, w jaki interpretacja operuje prawdopodobieństwem kwantowym; przez wiele lat przerzucano się argumentami za i przeciw twierdzeniu, iż możliwe jest wyprowadzenie reguły Borna z przesłanek wynikających z tej interpretacji. Everett utrzymywał, że rozwiązał ten problem już w swojej rozprawie doktorskiej, ale nie usatysfakcjonował wszystkich. Wydaje się, że nic nie stoi na przeszkodzie, aby obserwator w jakimś konkretnym wszechświecie zaobserwował serię wyników pomiarów, które nie zgadzają się z przewidywaniami reguły Borna.

Barwny przykład podsunął zwolennik interpretacji wieloświatowej Max Tegmark (jeszcze jeden były student Wheelera). Zaproponował eksperyment sprawdzający interpretację wieloświatową, który nie nadaje się dla ludzi o słabych nerwach. Naprawdę, badacze należący do tej kategorii powinni teraz odwrócić wzrok.

Zamiast podłączać urządzenie pomiarowe do wskaźnika, wyobraźmy sobie, że podłączmy je do karabinu maszynowego. Ustawiamy wszystko tak, że gdy zostaje zarejestrowany stan $\downarrow$ cząstki A, do komory karabinu maszynowego ładowany jest pocisk i broń strzela. Jeśli rejestrowany jest stan $\uparrow$, pocisk nie jest ładowany i zamiast wystrzału broń wydaje tylko donośny trzask. Stajemy w bezpiecznej odległości i włączamy aparaturę. Zostaje wytworzony jednostajny strumień cząstek A w superpozycji stanów $\uparrow$ i $\downarrow$. Z zadowoleniem zauważamy, że aparatura wystrzeliwuje pociski i wydaje donośne trzaski z jednakową częstotliwością w – jak się zdaje – losowym ciągu.

Teraz robi się nieco makabrycznie.

Ustawiamy się przed karabinem maszynowym wycelowanym w naszą głowę. (Obawiam się, że nie jestem aż tak przekonany do słuszności argumentów przemawiających za słusznością interpretacji

wieloświatowej, aby w ten sposób ryzykować własne życie, *ktoś* jednak musi przeprowadzić ten eksperyment). Rzecz jasna, jako zwolennicy interpretacji wieloświatowej zakładamy, że usłyszymy jedynie długą serię donośnych trzasków. Mamy świadomość, że są światy, w których nasz mózg dosłownie został rozbryzgany po ścianach laboratorium, ale nie martwi nas to szczególnie, są też bowiem inne, w których nic nam się nie stało.

Jeżeli nie zginęliśmy, to z definicji nasza historia jest jedną z tych, w których eksperymentator usłyszał tylko długą serię donośnych trzasków. Można sprawdzić, czy aparatura wciąż działa prawidłowo, odsuwając na chwilę głowę na bok. Powinniśmy wówczas znowu usłyszeć huk wystrzeliwanych pocisków. Z kolei jeśli interpretacja wieloświatowa jest błędna i funkcja falowa po prostu odzwierciedla zakodowaną informację albo kolaps jest fizycznie rzeczywistym zjawiskiem, to możemy mieć szczęście w pierwszych kilku pomiarach, lecz – nie miejmy złudzeń – wkrótce zginiemy. Przedłużające się pozostawanie przy życiu (co należałoby uznać za przejaw cudownej niewrażliwości na aparaturę, która powinna nas zabić) wyglądałoby na przekonujący dowód na słuszność interpretacji wieloświatowej.

Oprócz oczywistego zagrożenia dla życia problem z tym eksperymentem ujawnia się natychmiast, gdy próbujemy opublikować artykuł opisujący sceptycznej społeczności fizyków uzyskane przez nas wyniki. Mogą być światy, w których wszystko, co zarejestrowaliśmy, to długa seria donośnych trzasków. Jest jednak wiele innych światów, w których zostawiamy bardzo nieprzyjemny bałagan, i mnóstwo pytań, na które trzeba odpowiedzieć. Nie znika możliwość, że kiedy zechcemy powtórzyć eksperyment, wejdziemy do jednego z tych światów, a w takim wypadku będziemy mieli ogromny kłopot z przekonaniem kolegów po fachu, że nie oszaleliśmy. Tegmark napisał:

> Zapewne największa ironia mechaniki kwantowej kryje się w tym, że [...] kiedy czujesz, iż jesteś gotów umrzeć, i raz za razem usiłujesz popełnić kwantowe samobójstwo, eksperymentalnie się przekonujesz, że [interpretacja

wieloświatowa] jest poprawna, ale nie możesz przekonać o tym nikogo poza sobą![251]

Chciałbym w tym miejscu poczynić jeszcze jedną uwagę. Historia, w której słyszymy jedynie długą serię donośnych trzasków, sugeruje, iż w tym świecie superpozycja zawsze daje tylko wynik A↑. To mniej więcej to samo co rzucanie monetą i uzyskiwanie zawsze orła albo rzucanie kostką i otrzymywanie tylko szóstek. Tymczasem reguła Borna kategorycznie stwierdza, że prawdopodobieństwo zaobserwowania $A_{\uparrow}$ *i* $A_{\downarrow}$ powinno kształtować się 50:50. Jak można w tej sytuacji obronić regułę Borna?

Filozof David Wallace w opublikowanej w 2012 roku książce *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation* poświęcił trzy rozdziały na omówienie wnioskowania opartego na prawdopodobieństwie i statystyce. Jest to zapewne najbardziej wyczerpujące podsumowanie interpretacji Everetta, jakie kiedykolwiek się ukazało, lecz czytelnicy powinni mieć na uwadze, iż nie jest to książka popularnonaukowa, trudności z lekturą mogą mieć nawet studenci nieprzygotowani w zakresie fizyki i filozofii. Wallace stara się unikać sformułowania „wieloświatowa" (czytelnik niemal słyszy za sobą szept Wheelera: „potrzebne lepsze określenie"), ale podobnie jak Everett odwołuje się do subiektywnej, bayesowskiej teorii decyzji, twierdząc, że składowe funkcji falowej przekładają się na różne „wagi" różnych gałęzi. Wobec tego obserwator subiektywnie przyporządkowuje „prawdopodobieństwa wynikom przyszłych zdarzeń zgodnie z regułą Borna"[252].

Jednak w eksperymencie Tegmarka z kwantowym samobójstwem zawsze doświadczamy jedynie długiej serii donośnych trzasków, a to z pewnością prowadzi do wniosku, że w przyszłych zdarzeniach zawsze będziemy uzyskiwali tylko wynik A↑. Trzeba niezłej gimnastyki umysłowej, aby poradzić sobie z tym wyzwaniem. Jeżeli rzecz sprowadza się do oczekiwania różnych subiektywnych doznań, wówczas może będziemy skłonni zaakceptować tezę, iż śmierć nie jest doznaniem. Błąd tkwi właśnie w tym, jak eksperyment został zaplanowany. Wallace pisze: „eksperymenty dostarczające dowodów

wspierających podstawy mechaniki kwantowej zwykle nie kończą się śmiercią eksperymentatora, a już na pewno nie osób postronnych, takich jak autor książki!”[253]

Przyznaję, że nie jestem przekonany. I nie jestem w tym odosobniony. Lev Vaidman – kolejny zwolennik interpretacji wieloświatowej – również nie podziela tego zdania[254].

Wróćmy na chwilę do dyskusji z rozdziału 5. Załóżmy, że przygotowaliśmy zbiór cząstek A w superpozycji stanów spinu ↑ i ↓, ale dokonujemy *pomiaru* wyników w zakresie bazy + i –. Wobec potencjalnie dużej liczby sposobów wyrażenia superpozycji w kategoriach różnych stanów bazowych, w których możemy swobodnie przebierać, jakim sposobem gałęzie mogą „wiedzieć”, która baza odpowiada wynikom, jakie będą rejestrowane? Jest to problem „preferowanej bazy”.

Jak widzieliśmy, lokalizacja różnych wyników pomiaru przez dekoherencję zapewne pomaga pozbyć się członów interferencyjnych (albo przynajmniej je zminimalizować), ale nadal musimy *przyjmować założenie*, iż w rezultacie funkcja falowa jest w jakiś sposób kierowana ku preferowanej bazie. W sugerowanej przez Wallace’a wersji interpretacji Everetta rzeczywista funkcja falowa wchodzi w interakcję z klasycznym przyrządem pomiarowym i środowiskiem, ewoluując naturalnie w superpozycję wyników pomiaru. Człony interferencyjne są zdławione i końcowe wyniki urzeczywistniają się w różnych gałęziach. Wallace pisze: „Dekoherencja jest dynamicznym procesem, w wyniku którego dwa składniki złożonego bytu (stanu kwantowego) zaczynają ewoluować niezależnie od siebie, i dzieje się tak za sprawą wysoce zaawansowanych, emergentnych skutków konkretnej dynamiki i stanu początkowego naszego wszechświata”[255]. Dekoherencja więc naturalnie i gładko łączy początkową funkcję falową z preferowaną bazą, określoną przez sposób przygotowania eksperymentu.

Może to brzmieć prawdopodobnie, ale wróćmy teraz – koniec końców – do komputerów kwantowych. Okazuje się, że kubity mogą być przetwarzane przez taki komputer na więcej niż jeden sposobów. Zamiast przetwarzać je w kolejności, „jednokierunkowy” komputer

kwantowy oparty na mocno splątanym „stanie klastrowym" wykonuje nieodwracalne pomiary na jednym kubicie i przekazuje dalej wyniki. Wynik (losowy) uzyskany w jednym kroku determinuje *bazę* do zastosowania w następnym kroku, a natura pomiarów i kolejność ich wykonywania może być konfigurowana, aby wykonywany był konkretny algorytm[256]. Taki komputer opisali w 2001 roku Robert Raussendorf i Hans Briegel[257], a w 2005 roku informowano o zademonstrowaniu praktycznego wykorzystania czterokubitowego klastra do wykonywania obliczeń[258].

Zatem w komputerze opartym na stanie klastrowym baza dla każdego pomiaru zmienia się w sposób losowy dla każdego kroku i będzie różna dla różnych kubitów. Zauważmy, że podczas gdy „pomiar" jest tu nieodwracalny, nie obejmuje on aktu zwielokrotnienia, który mógłby doprowadzić do dekoherencji. Wprost przeciwnie. Superpozycje konieczne do poprawnego działania komputera kwantowego muszą pozostać spójne – maksymalna długość obliczeń określona jest przez czas podtrzymywania koherencji. W takim układzie dekoherencja jest niechcianym „szumem".

Nawet jeśli byłoby możliwe, że preferowana baza wyłaniałaby się w jakiś sposób na pierwszym etapie procesu obliczeniowego, niekoniecznie będzie to baza potrzebna w następnym kroku sekwencji. Dekoherencja nam tu nie pomoże. Filozof Michael Cuffaro pisze: „Wobec tego nie ma sposobu, aby charakteryzować komputer stanu klastrowego jako maszynę wykonującą obliczenia w wielu światach, ponieważ nie ma szans, w kontekście komputera stanu klastrowego, nawet na *zdefiniowanie* tych światów dla celów opisu procesu obliczeniowego jako całości"[259].

W tym przypadku wątpliwe jest, aby wiele światów lub wieloświat odgrywały jakąkolwiek użyteczną rolę jako element myślenia o funkcjonowaniu komputerów kwantowych. Cuffaro wierzy, że z jego argumentacją powinni w dużej mierze zgodzić się ci zwolennicy interpretacji, którzy do fizycznej realności różnych światów lub gałęzi podchodzą z pewnym dystansem[260]. Innymi słowy, jeżeli założenie wielu światów jest po prostu wygodnym

sposobem myślenia o problemie, ale nie przyjmuje się, że są one fizycznie realne, to nie ma po co bić piany.

Wallace przyznaje, że podczas gdy to, co nazywa „masowym paralelizmem" (czyli wieloświat), mogło być na początku użyteczne jako sposób myślenia o komputerach kwantowych, to jednak „potem okazało się niespecjalnie produktywne". Pisze dalej: „Interpretacja Everetta raczej nie prowadzi też do przeciwnego wniosku: masowy równoległoświatowo-klasyczny miszmasz nakazywałby myśleć o stanie kwantowym jako o czymś, co przydarza się tylko emergentnie, w odpowiednich okolicznościach, i nie ma powodu, aby miał być dostępny dla układów z natury mikroskopowych (czyli niepodlegających dekoherencji)[261]. Natomiast w okolicznościach dopuszczających dekoherencję, jeśli chodzi o Wallace'a, to całe to mrowie emergentnych światów jest rzeczywiste „w tym samym znaczeniu, jak rzeczywiste są Ziemia i Mars"[262].

Wallace jest filozofem i jego rozmyślania na temat rzeczywistości wieloświata w dużej mierze ograniczają się do pism filozoficznych i książek. Deutsch jest jednak fizykiem. Mimo to on również nalega, aby pogodzić się z tym, iż światy te naprawdę istnieją: „Według mnie stan dyskusji i materiałów dowodowych wskazuje na bliskie podobieństwo do sprawy dinozaurów. Mianowicie: one są realne – pogódźcie się z tym!"[263].

Wierzę, że obecnie przekroczyliśmy próg. Stwierdziłem, że nie jest możliwe uprawianie nauki w jakimkolwiek zakresie bez odwoływania się do metafizyki. Kiedy jednak metafizyka całkowicie nas przytłacza i gaśnie nadzieja na jakikolwiek kontakt z Rzeczywistością Empiryczną – kiedy zostaje tylko metafizyka – ośmielę się twierdzić, że takie spekulacje *nie są już naukowe*. Statek Nauki znalazł się na samej granicy Charybdy i wpadł w jej potężny uścisk. Z niepokojem patrzymy, jak zaczyna się zsuwać w przerażający wir.

W ostatnich latach do świadomości opinii publicznej przedostały się różne odmiany teorii wieloświata, wywodzące się z kosmologicznej teorii „wiecznej inflacji" i tak zwanego kosmicznego krajobrazu teorii strun. Warianty te mocno się różnią: powstały z różnych przesłanek i roszczą sobie pretensje do „wyjaśnienia" różnych aspektów fundamentalnej fizyki i kosmologii. Rozbudzają jednak dyskusje,

w których powtarzają się mniej więcej te same argumenty. Zatem Martin Rees, astronom królewski na brytyjskim dworze, oznajmia, iż kosmologiczny wieloświat nie jest metafizyką, lecz ekscytującą nauką, która „może okazać się prawdziwa", i mógłby postawić na nią swoje pieskie życie[264].

Pomimo różnego pochodzenia i ukierunkowania na objaśnianie innych zagadnień niektórzy teoretycy szukali sposobu na połączenie tych odmiennych teorii wieloświata w jedną strukturę. W swej ostatniej książce, zatytułowanej *Nasz matematyczny Wszechświat*, Tegmark porządkuje te różne podejścia w hierarchiczny system o czterech „poziomach"[265]. Wieloświat poziomu I obejmuje wszechświaty charakteryzujące się różnymi zbiorami warunków początkowych Wielkiego Wybuchu i historiami, ale rządzone przez te same fundamentalne prawa fizyki. Jest to wieloświat wiecznej inflacji. Poziom II to wieloświat, w którym wszechświaty charakteryzują te same fundamentalne prawa fizyki, ale działanie owych praw jest różne (na przykład obowiązują inne stałe fizyczne). Przyszło nam żyć we wszechświecie, w którym prawa i stałe umożliwiają istnienie inteligentnych istot żywych (jest to problem „precyzyjnego dostrojenia"). Poziom III to wieloświat z interpretacji wieloświatowej mechaniki kwantowej. Poziom IV – wieloświat wszystkich możliwych struktur matematycznych, odpowiadających różnym fundamentalnym prawom fizyki.

Pozostawiam czytelnikom decyzję, co o tym sądzić.

Interpretacja wieloświatowa i różne odmiany teorii wieloświata przyciągnęły część szeroko znanych postaci świata nauki, wśród których są Sean Carroll, Neil deGrasse Tyson, David Deutsch, Brian Greene, Alan Guth, Lawrence Krauss, Andriej Linde, Martin Rees, Leonard Susskind, Max Tegmark, Lev Vaidman i David Wallace. Zauważmy, że lista zawiera „neoeverettian", którzy niekoniecznie interpretują wieloświat realistycznie, ale wolą myśleć o nim jako o użytecznym narzędziu pojęciowym. Co ciekawe, najwięcej jest w tym gronie filozofów. To naukowcy zwykle chcą być tak bardzo dosłowni. Wśród tych, którzy wypowiadają się krytycznie wobec tego rodzaju podejścia – ze wszystkich możliwych powodów – znajdują się Paul Davies, George Ellis, David Gross, Sabine Hossenfelder,

Roger Penrose, Carlo Rovelli, Joe Silk, Paul Steinhardt, Neil Turok i Peter Woit. Przychylam się do ich zdania[266].

Oczywiście, pracownicy naukowi na uniwersytetach mają swobodę wyboru, w co chcą wierzyć, i w granicach zdrowego rozsądku mogą publikować i mówić, co im się podoba. Jednak w przypadku ich publicznych wystąpień i publikacji często przymyka się oko lub po prostu ignoruje mocno spekulatywną i kontrowersyjną naturę teorii wieloświata. Wieloświat jest fajny. Umieszczenie wieloświata w tytule lub nagłówku artykułu zwiększa prawdopodobieństwo, że przykuje on uwagę, przedostanie się do mediów głównego nurtu, zachęci do kliknięcia lub zakupu.

Teoria wieloświatowa może też być utożsamiana z modnym trendem odrzucania interpretacji kopenhaskiej, a najważniejsze związane z nią postacie (szczególnie Everett i DeWitt) – idealizowane i odmalowywane jako bohaterowie, którzy „pokazali im, gdzie raki zimują", a „im" oznacza w tym wypadku Bohra i Heisenberga, wraz z ich nikczemną ortodoksją[267]. Taki obraz kreśli Adam Becker w swojej najświeższej książce *What is Real?* Becker twierdzi, że teorie „mają dostarczać objaśnień, łączyć wcześniej odmienne pojęcia i pozostawać w jakimś związku z otaczającym nas światem"[268]. Kiedy jednak tracimy jakikolwiek kontakt z Rzeczywistością Empiryczną i zostaje nam już tylko metafizyka, kto decyduje, co oznacza „w jakimś związku"?

W swojej ostatniej książce na temat mechaniki kwantowej Lee Smolin nazywa tę tendencję „realizmem magicznym"[269]. Osobiście uważam, że jest to bardzo niebezpieczny obszar. Pokusa, aby jeden dogmat zwalczać jeszcze głębszymi dogmatami, może okazać się trudna do zwalczenia. W połączeniu z innymi spekulatywnymi teoriami fundamentalnej fizyki wieloświat nakłania nas do odejścia od pojęcia metody naukowej, postrzeganego przez wielu jako staroświeckie i kojarzącego się z obsesją na punkcie dowodów empirycznych, przyzwyczajeniem, które najchętniej zastąpiliby afirmacją „oszczędności" mającej źródło w czysto metafizycznych objaśnieniach.

Nic dobrego z tego nie może wyniknąć w czasach, gdy autorytet nauki jest coraz mocniej podważany przez promotorów stanowczo

antynaukowego programu. Znakomity duński historyk nauki Helge Kragh podsumowuje to takimi słowami:

> Jednak, jak przekonywano, inteligentny projekt jest niewiele słabiej podatny na weryfikację niż wiele teorii wieloświatowych. Odrzucenie inteligentnego projektu dlatego, że nie można go zweryfikować, a jednoczesne akceptowanie wieloświata jako interesującej hipotezy naukowej, *niepokojąco przypomina stosowanie podwójnych standardów*. Z perspektywy kreacjonistów, jak też niektórych niekreacjonistów ich idea uzyskała niezamierzone metodologiczne wsparcie ze strony fizyków optujących za wieloświatem[270].

Nie chcę być źle zrozumiany. W pełni rozumiem, dlaczego ci teoretycy i filozofowie, którzy wolą przyjąć realistyczną perspektywę, czują, że nie mają wyboru i muszą opowiedzieć się za interpretacją wieloświatową. Jednakże wobec braku dowodów *osobiste preferencje nie przekładają się na realnie istniejące elementy świata fizycznego*. Jeśli o mnie chodzi, chętnie się zgodzę, że teoria wieloświatowa ma ogromną wartość *jako sposób myślenia* o funkcjonowaniu komputerów kwantowych. *Jednak myślenie o tych światach nie sprawia, że one rzeczywiście istnieją*. I podczas gdy alternatywne antyrealistyczne interpretacje mogą być dla niektórych mniej akceptowalne na gruncie filozofii, trzeba przyznać, że nie ciągną za sobą tak dużo metafizycznego balastu. Sam formalizm pozostaje obojętnie neutralny i nieprzenikniony. Nieważne, jakie znaczenia mu przypisujemy.

Jeszcze jedna uwaga na koniec. W przeciwieństwie do dużo bardziej szokująco spekulatywnych interpretacji realistycznych, jakie wcześniej rozważaliśmy, interpretacje oparte na wielu światach lub wieloświecie nie oferują żadnych wskazówek, jak moglibyśmy uzyskać jakiekolwiek dowody empiryczne. Właśnie w tym miejscu, przynajmniej w moich oczach, teorie wieloświatowe naprawdę się załamują. Nieważne, jakie wyobrażenia mamy na temat możliwości „objaśniania” przez nie kwantowej natury rzeczywistości, musimy

przyznać, że takie objaśnienia nie mają nic lub niewiele do zaproponowania w sferze rozwiązań praktycznych. Nie stanowią podstawy do podjęcia jakichkolwiek działań w odniesieniu do Czwartego Sądu Logicznego. Nawet gdy formułowane są przewidywania, to tylko nieznacznie różnią się one od cytowanych przez Poppera mglistych szarad wypowiadanych przez jasnowidzów. Można się było tego spodziewać. W istocie to właśnie przed tym przestrzegał nas Einstein w 1950 roku, gdy tłumaczył, że „zamiłowanie do objęcia rozumem" prowadzi do „iluzji, iż człowiek jest zdolny racjonalnie pojąć obiektywny świat, posługując się czystą myślą, bez oparcia jej na jakichkolwiek empirycznych podstawach – w skrócie, odwołując się do metafizyki"[271].

Jak wyjaśniłem w rozdziale 3, filozof James Ladyman sugeruje, że oczekujemy od instytucji świata nauki nakreślenia linii demarkacyjnej, oddzielającej naukę od tego, co nauką nie jest, a więc obrony jej integralności przez wykluczanie roszczeń do obiektywnej wiedzy opartych na czystej metafizyce. Jednak na razie instytucje te nie zapobiegły publikacji w pismach *naukowych* artykułów niezawierających żadnych danych empirycznych, za to wypełnionych spekulatywnym teoretyzowaniem, które nie daje żadnej nadziei lub marną obietnicę, iż uda się złapać jakikolwiek kontakt z Rzeczywistością Empiryczną. Pomimo wysiłków kosmologa George'a Ellisa i astrofizyka Joe Silka, którzy w 2014 roku głośno wyartykułowali swoje wątpliwości i wezwali część z tych instytucji do „obrony integralności fizyki"[272], niewiele się zmieniło. Ladyman zdaje się pogodzony z losem: „Może się zdarzyć – i rzeczywiście zdarza się – że w gronie ekspertów rozpowszechni się mylny pogląd w sprawach o fundamentalnym znaczeniu" – mówi mi[273]. Wierzy, że na dłuższą metę zostanie wprowadzona poprawka, gdy w nauce dojdzie do prawdziwego przełomu.

Zanim tak się stanie, nie mamy wyboru, jak tylko z przerażeniem obserwować Statek Nauki znikający w odmętach strasznego wiru. Nikt się nie uratuje.

224 Albert Einstein, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, „Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)" 1916, t. XXXII, s. 688–696. Cyt. za: Gennady E. Gorelik i Viktor Ya. Frenkel, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*, Birkhäuser Verlag, Bazylea 1994. Cytat pojawia się na s. 86.

225 Hugh Everett III, *'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics*, „Reviews of Modern Physics" 1957, nr 29, s. 454–462, przedruk w: John Archibald Wheeler i Wojciech Hubert Żurek (red.), op. cit., s. 315–323. Cytat pojawia się na s. 316. Kursywa w oryginale. Powinienem zaznaczyć, że w czerwcu 1956 roku Everett opuścił środowisko akademickie i dołączył do działającej w Pentagonie Grupy Oceniającej Systemy Uzbrojenia. Choć Wheeler nie został wymieniony jako współautor, to jednak treść artykułu jest wynikiem narzuconego przez niego kompromisu, z którego Everett nigdy nie był zadowolony.

226 Hugh Everett III, *The Theory of the Universal Wave Function*, rozprawa doktorska na Uniwersytecie Princeton. Przedruk w: Bryce S. DeWitt i Neill Graham (red.), *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Pergamon Press, Oksford 1975. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

227 Hugh Everett III, *The Theory of the Universal Wave Function*, op. cit., przypis na s. 68. Kursywa w oryginale.

228 Stefano Osnaghi, Fábio Freitas i Olival Freire Jr, *The Origin of the Everettian Heresy*, „Studies in the History and Philosophy of Modern Physics" 2009, nr 40, s. 111.

229 Hugh Everett III, *The Theory of the Universal Wave Function*, op. cit., s. 9.

230 Nancy G. Everett, list do Franka J. Tiplera, 10 października 1983 roku. Cyt. za: Eugene Shikhovtsev, *Biographical Sketch of Hugh Everett, III*, dostępne w wersji internetowej na stronie zarządzanej przez Maxa Tegmarka: http://space.mit.edu/home/tegmark/everett/everett.html.

231 Bryce S. DeWitt, *Quantum Mechanics and Reality*, „Physics Today" 1970, nr 23, s. 30. Przedruk w: Bryce S. DeWitt i Neill Graham (red.), op. cit.

232 Co ciekawe, w swoim artykule, opublikowanym na łamach „Physics Today", DeWitt stwierdził, że dotyczący kolapsu postulat von Neumanna był częścią interpretacji „konwencjonalnej" lub „kopenhaskiej". Tymczasem formalna teoria pomiaru nigdy nie stanowiła części ortodoksji kopenhaskiej (biograf Bohra Abraham Pais w jednym ze starych zeszytów DeWitta znalazł notatkę, której treść odnosiła się do wykładu wygłoszonego przez Bohra w listopadzie 1954 roku: „[Bohr] uważa, że pojęcie »kwantowa teoria pomiaru« jest niewłaściwie

sformułowane" (zob. Abraham Pais, *Czas Nielsa Bohra: w fizyce, filozofii i polityce*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006). W istocie dlaczego antyrealistyczna interpretacja, która nakreśla linię podziału między światem klasycznym a kwantowym, miałaby wymagać kwantowej teorii pomiaru? O ile zwrot „konwencjonalna" jest odpowiedni, o tyle DeWitt błędnie interpretuje przymiotnik „kopenhaska" i wygląda to tak – przynajmniej moim zdaniem – jakby świadomie ją demonizował. Więcej zob. w dalszej części tego rozdziału.

233 Cyt. za: P.C.W. Davies i Julian R. Brown (red.), *Duch w atomie…*, op. cit., s. 60.

234 John Archibald Wheeler, list do Paula Benioffa, datowany na 7 lipca 1977 roku. Cyt. za w: Eugene Shikhovtsev, *Biographical Sketch of Hugh Everett, III*, op. cit.

235 Bryce S. DeWitt, *Quantum Mechanics and Reality*, op. cit., s. 33.

236 Spostrzeżenie to często przypisuje się Johnowi Wheelerowi, ale ja znalazłem je w wywiadzie udzielonym przez Davida Deutscha, zamieszczonym w: P.C.W. Davies i Julian R. Brown (red.), *Duch w atomie*…, op. cit.

237 H. Dieter Zeh, *The Problem of Conscious Observation in Quantum Mechanical Description*, „Foundations of Physics Letters" 2000, nr 13, s. 221–233. Zob. też: arXiv:quant-ph/9908084v3, 5 czerwca 2000 roku. Zeh wyjaśnia, że artykuł ten jest uaktualnioną wersją wcześniejszego, który w 1981 roku początkowo nieformalnie krążył jako publikacja w „Epistemological Letters", wydawanych przez Ferdinand-Gonseth Association w szwajcarskim Biel.

238 Michael Lockwood, *Mind, Brain and the Quantum. The Compound 'I'* , Blackwell, Oksford 1990.

239 David Z. Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Cambridge MA 1992.

240 John. S. Bell, *Quantum Mechanics for Cosmologists*, w: Christopher Isham, Roger Penrose i Dennis Sciama (red.), *Quantum Gravity 2*, Clarendon Press, Oksford 1981. Artykuł został przedrukowany w: John S. Bell, *Speakable and Unspeakable*…, op. cit., s. 117–138. Cytat pojawia się na s. 118.

241 Murray Gell-Mann, *Kwark i jaguar: przygody z prostotą i złożonością*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo CiS, Warszawa 1996.

242 Tak jak nie ma jednej jedynej „interpretacji kopenhaskiej".

243 Adrian Kent, *One World versus Many: The Inadequacy of Everettian Accounts of Evolution, Probability, and Scientific Confirmation*, w: Simon Saunders,

Jonathan Barrett, Adrian Kent i David Wallace (red.), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality*, Oxford University Press, Oksford 2010, s. 310.

244 David Deutsch, *Struktura rzeczywistości*, przeł. Jerzy Kowalski-Glikman, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.

245 Ibidem.

246 Zgodnie z *prawem Moore'a* (od nazwiska Gordona Moore'a, jednego z założycieli Intela), liczba tranzystorów w procesorach komputerowych podwaja się w okresie od 18 miesięcy do 2 lat.

247 Rozkład na czynniki polega na znalezieniu liczb całkowitych, które są czynnikami większej liczby całkowitej. Na przykład liczbę 42 można rozłożyć na czynniki 6 × 7. Rozkład na czynniki pierwsze polega na znalezieniu czynników, które są liczbami pierwszymi, czyli takich, których nie da się już rozłożyć na czynniki. Wobec tego czynnikami pierwszymi liczby 42 są 2, 3 i 7.

248 W tej kwestii należy zachować odrobinę ostrożności. Komputery kwantowe oferują wykładniczy postęp szybkości obliczeń tylko w odniesieniu do pewnych zagadnień, takich jak choćby rozkład na czynniki. W przypadku innych problemów – na przykład sortowania – komputery kwantowe nie mają żadnej przewagi nad konwencjonalnymi maszynami. Zob. wywiad Petera Shora z Johnem Horganem: https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/quantum-computing-for-english-majors/ (dostęp 12.01.2021).

249 David Deutsch, *Struktura rzeczywistości*, op. cit.

250 D-Wave 2000Q System bazuje na procesorze kwantowym zawierającym 2000 nadprzewodzących kubitów i rzekomo kosztował 15 milionów dolarów. Jest jednak pewien istotny szczegół. Otóż owszem, powszechnie przyjmuje się, że maszyny D-Wave rzeczywiście oparte są na technologii komputerów kwantowych, ale wiele zainstalowanych tam kubitów potrzebnych jest do bardziej do korygowania błędów niż do wykonywania obliczeń.

251 Max Tegmark, *The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words?*, „Fortschritte der Physik" 1998, nr 46, s. 855–862. Zob. też: arXiv:quant-ph/9709032v1, 15 września 1997 roku. Cytat pojawia się na stronie s. 5.

252 David Wallace, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*, Oxford University Press, Oksford 2012, s. 158.

253 Ibidem, s. 371.

254 Lev Vaidman, *Review: David Wallace, The Emergent Multiverse*, „British Journal for the Philosophy of Science" 2014, nr 66, s. 465–468. Zob. też: Lev Vaidman, *Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, „Stanford Encyclopedia of Philosophy", uaktualnienie 17 stycznia 2014 roku.

255 David Wallace, *Decoherence and Ontology (or: How I Learned to Stop Worrying and Love FAPP)*, w: Simon Saunders, Jonathan Barrett, Adrian Kent i David Wallace (red.), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality*, Oxford University Press, Oksford 2010, s. 62.

256 Na przykład pewien szczególny układ czterech kubitów tworzących obwód można wykorzystać do implementacji algorytmu przeszukiwania baz danych, opracowanego w 1996 roku przez Lova Grovera.

257 Robert Raussendorf i Hans J. Briegel, *A One-Way Quantum Computer*, „Physics Review Letters" 2001, nr 86, s. 5188–5191.

258 P. Walther, K.J. Resch, T. Rudolph, E. Schenck, H. Weinfurter, V. Vedral, M. Aspelmeyer i A. Zeilinger, *Experimental One-Way Quantum Computing*, „Nature" 2005, nr 434, s. 169–176. Zob. też: arXiv:quant-ph/0503126, 14 marca 2005 roku.

259 Michael Cuffaro, *Many Worlds, the Cluster State Quantum Computer, and the Problem of the Preferred Basis*, „Studies in History and Philosophy of Modern Physics" 2012, nr 43, s. 35–42. Zob. też: arXiv:physics. hist-ph/1110.2514v2, 10 stycznia 2012 roku. Cytat pojawia się na s. 17.

260 Michael Cuffaro, kontakty osobiste, 19 czerwca 2019 roku.

261 David Wallace, kontakty osobiste, 25 czerwca 2019 roku.

262 David Wallace, kontakty osobiste, 27 czerwca 2019 roku.

263 David Deutsch, wywiad z Johnem Horganem, *The Infinite Optimism of Physicist David Deutsch*, 17 stycznia 2018 roku, https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/the-infinite-optimism-of-physicistdavid-deutsch/ (dostęp 11.01.2021).

264 Martin Rees, *What are the Limits of Human Understanding?*, „Prospect Magazine", 13 listopada 2018 roku, https://www.prospectmagazine.co.uk/magazine/martin-rees-what-are-the-limits-of-humanunderstanding (dostęp 11.01.2021).

265 Max Tegmark, *Nasz matematyczny Wszechświat. W poszukiwaniu prawdziwej natury rzeczywistości*, przeł. Bogumił Bieniok, Ewa L. Łokas, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015, zob. zwłaszcza rozdział 8.

266 Zob. np.: Jim Baggott, *Pożegnanie z rzeczywistością…*, op. cit., zwłaszcza rozdział 9; Sabine Hossenfelder, *Zagubione w matematyce: fizyka w pułapce piękna*, przeł. Tomasz Miller, Copernicus Center Press, Kraków 2019.

267 Zob. Christopher A. Fuchs, *Copenhagen Interpretation Delenda Est?*, arXiv:quant-ph/1809.05147v2, 11 listopada 2018 roku.

268 Adam Becker, *What is Real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics*, John Murray, Londyn 2018, s. 264.

269 Lee Smolin, *Niedokończona rewolucja Einsteina: w poszukiwaniu tego, co leży poza granicami teorii kwantowej*, przeł. Urszula i Mariusz Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2021, s. 21.

270 Helge Kragh, *Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology*, Oxford University Press, Oksford 2011, s. 285. Kursywa wprowadzona przeze mnie.

271 Albert Einstein, *On the Generalized Theory of Gravitation*, „Scientific American", nr 182 (kwiecień 1950), s. 13. Einstein kontynuuje tak: „Wierzę, że każdy prawdziwy teoretyk jest swego rodzaju poskromionym metafizykiem, nieważne, za jak czystego pozytywistę sam siebie uważa. Metafizyk wierzy, że to, co logicznie proste, jest również rzeczywiste. Poskromiony metafizyk wierzy zaś, że nie wszystko to, co logicznie proste, realizowane jest w doświadczanej przez nas rzeczywistości, lecz ogół wrażeń sensorycznych da się »objąć rozumem« na bazie systemu pojęciowego zbudowanego na bardzo prostych przesłankach".

272 George Ellis i Joe Silk, *Scientific Method: Defend the Integrity of Physics*, „Nature" 2014, nr 516 (2014), s. 321–323.

273 James Ladyman, kontakty osobiste, 29 marca 2019 roku.

EPILOG

Mam co do tego bardzo złe przeczucia

Cokolwiek o tym myślisz, sądzę, że zgodzisz się, iż mechanika kwantowa jest nadzwyczajną teorią. Zmusza nas do zmierzenia się z trudnymi pytaniami na temat tego, co naszym zdaniem robimy, gdy budujemy naukowe odwzorowanie rzeczywistości fizycznej, i czego się po nim spodziewamy. Stawia nas też wobec prostych prawd filozoficznych, które zbyt łatwo dawało się ignorować w mechanice klasycznej.

Mam nadzieję, że wystarczająco wyjaśniłem w tej książce naturę naszych dylematów. Możemy przyjąć interpretację antyrealistyczną, w której znikają wszystkie problemy konceptualne, ale która zobowiązuje nas do pogodzenia się z tym, że dotarliśmy do granic naszych zdolności poznania głębszej prawdy o rzeczach samych w sobie. Interpretacje antyrealistyczne mówią nam, że nie ma tu na co patrzeć. Z konieczności nie podsuwają żadnych wskazówek, gdzie moglibyśmy szukać czegoś nowego, czegoś, co dałoby się odkryć albo zrozumieć. Są bierne. Niemi świadkowie niepoznawalności natury.

Z kolei prostsze i łatwiejsze do przyjęcia interpretacje realistyczne, oparte na lokalnych lub kryptolokalnych zmiennych ukrytych, wprost przeciwnie, oferują mnóstwo wskazówek i nieustannie motywują do coraz bardziej wymyślnych i wyrafinowanych eksperymentów. Niestety, dowody są przytłaczające i wszyscy fizycy, oprócz tych najbardziej upartych, akceptują fakt, że natura odmawia nam tak łatwego wyjścia z sytuacji. Jeżeli wolimy interpretację realistyczną,

przyjmując za dobrą monetę funkcję falową i wszystkie wynikające stąd problemy konceptualne, to pozostaje nam tylko wybór spośród czegoś, co mogę nazwać jedynie ciężkostrawnym złem. Możemy wybrać teorię de Broglie'a–Bohma i przełknąć nielokalne upiorne działanie na odległość. Możemy dodać, nieco *ad hoc*, mechanizm spontanicznego kolapsu i być dobrej myśli. Możemy zdecydować się na dorzucenie do tej mikstury świadomości, scalając dwa – zdawałoby się – nierozwiązalne problemy. Albo możemy wybrać interpretację wielu światów Everetta i wieloświat.

Smolin w swojej niedawno wydanej książce *Niedokończona rewolucja Einsteina* dochodzi do wniosku, że mechanika kwantowa musi być niepełna, ale „realizm, w jakiejkolwiek wersji, ma swoją cenę. Trzeba tylko odpowiedzieć sobie, jaką cenę mamy zapłacić, żeby uzyskać nową teorię, która absolutnie ma sens i opisuje naturę poprawnie, nie zostawiając żadnych luk"[274]. Tobie pozostawię decyzję, która z rozważanych w tej książce interpretacji może być warta swojej ceny (lub która jest mniejszym złem). Smolin pozostaje nieprzekonany do żadnej z nich i jest już znużony szczegółowym omawianiem stosowanych obecnie podejść. Czuje, że nie ma innego wyjścia, jak „poczłapać zarośniętą ścieżką przez bagna" w poszukiwaniu nowych idei, wiedząc, że „niemal na pewno skończy się to porażką, ale mam nadzieję, że uda mi się wysłać raporty, które mogą zainteresować i zainspirować kilku innych poszukiwaczy, mających świadomość naszej ignorancji i czujących w kościach, że poddaliśmy się za szybko"[275].

Biorąc to wszystko pod uwagę, przez wiele lat preferowałem realizm Einsteina. Popierałem głoszone przez Bella odrzucenie ortodoksji kopenhaskiej (nadal to robię). Szkoliłem się na eksperymentatora i twierdzę, że bardzo trudno jest przeprowadzać jakiekolwiek doświadczenie – interweniować, mówiąc językiem Hackinga – bez silnej wiary w realność rzeczy, które badasz. Właśnie dlatego uważam, że niezmiernie ważne jest wyjaśnienie, co znaczy być „realistą" w świetle czterech sądów logicznych, które wyłożyłem w rozdziałach 2 i 3. Niewielu naukowców będzie zgłaszało zastrzeżenia do Pierwszego Sądu Logicznego (obiektywna rzeczywistość) i Drugiego Sądu Logicznego (realizm bytu). Choć

moje realistyczne przekonania pozostają niewzruszone, to jednak im więcej o tym myślę, tym bardziej podaję w wątpliwość Trzeci Sąd Logiczny, założenie, że podstawowe koncepcje teorii (takie jak kwantowa funkcja falowa) muszą odzwierciedlać realne stany fizyczne. Z upływem lat nabrałem pewnych konkretnych wątpliwości.

Podobnie jak wielki filozof Han Solo mam co do tego bardzo złe przeczucia.

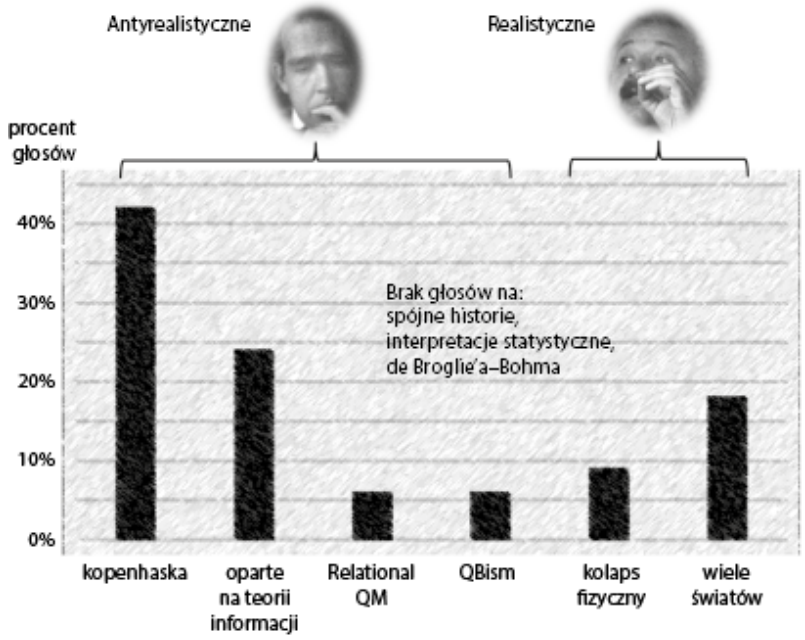
Pozostawię was zaledwie z dwoma powodami mojego zwątpienia. Jeden wywodzi się wprost ze sposobu, w jaki rutynowo stosujemy mechanikę kwantową. Wyjaśniałem, że nie ma czegoś takiego jak „właściwa" funkcja falowa oraz że zakładając, iż postępujemy zgodnie z zasadami, mamy absolutną swobodę wyrażenia funkcji falowej w taki sposób, który najlepiej pasuje do naszego problemu. W istocie kiedy cofniemy się o krok i uważnie przyjrzymy się temu, co robimy, gdy posługujemy się formalizmem kwantowym, uświadomimy sobie, że w większości przypadków nie korzystamy z funkcji falowej w ogóle. Posługujemy się obiektami matematycznymi w rodzaju operatorów rzutowania, amplitudy rzutowania i wartości oczekiwanych, które *wywodzą* się z funkcji falowych i są ściślej powiązane z tym zasobem wiedzy, który nazywamy fizyką kwantową. Żeby tego dokonać, *nie potrzebujemy wiedzy, jak naprawdę wygląda funkcja falowa*. Musimy jedynie wiedzieć, jakie są relacje między jednym stanem kwantowym a drugim, a tę wiedzę czerpiemy z naszego fizycznego doświadczenia.

Z pewnością taka swoboda i elastyczność kłóci się z jakąkolwiek realistyczną interpretacją funkcji falowej. Chociaż nie przepadam za relacyjną interpretacją Rovellego, muszę przyznać, że jego pomysł, iż funkcja falowa jest tylko sposobem „kodowania" naszego doświadczenia, zaczął wzbudzać głęboki oddźwięk.

Drugim powodem jest fakt, że wyniki doświadczeń zaprojektowanych w celu zbadania nierówności Bella i Leggetta powinny każdego realistę skłonić do zatrzymania się i pomyślenia. Stałem się bardzo nieufny wobec ogromnej ceny, jaką musimy płacić za *dowolną* interpretację realistyczną, która nie została jeszcze wykluczona eksperymentalnie, a moją szczególną nieufność budzą

interpretacje realistyczne, które nie nadają się do badania drogą eksperymentu. Tak, przyjmuję do wiadomości, że niektóre z nich skutecznie zmotywowały naukowców do podjęcia nowych badań doświadczalnych, w myśl Czwartego Sądu Logicznego, jednak muszę wyznać, że w chwilach słabości dopadają mnie złe przeczucia co do wyników tych eksperymentów.

Nie jestem jedyny. Chociaż nie powinniśmy wyciągać daleko idących wniosków, to ankieta przeprowadzona wśród 33 naukowców zgromadzonych na konferencji poświęconej fundamentom mechaniki kwantowej, odbywającej się w 2011 roku w Traunkirchen w Austrii, sugeruje dużą przewagę zwolenników interpretacji antyrealistycznych (zob. rysunek 17)[276]. Z pewnością nie jest to ani znacząca statystycznie liczba respondentów, ani w pełni obiektywna próbka – konferencja została zorganizowana przez Antona Zeilingera, co może tłumaczyć dość dużą przewagę interpretacji opartej na teorii informacji i całkowity brak głosów na rzecz teorii de Broglie'a–Bohma i spójnych historii. Dało się też zauważyć nieobecność wymienionych w rozdziale 10 czołowych rzeczników interpretacji wielu światów. Niemniej wyniki są dość zastanawiające.



Rysunek 17. Wyniki ankiety wielokrotnego wyboru, przeprowadzonej wśród 35 uczestników konferencji *Quantum Physics and the Nature of Reality*,

zorganizowanej w lipcu 2011 roku przez Antona Zeilingera i odbywającej się w Międzynarodowej Akademii w Traunkirchen w Austrii. Niniejsza grafika przedstawia wyniki uzyskane od 33 respondentów w odpowiedzi na pytanie: „Jaka jest twoja ulubiona interpretacja mechaniki kwantowej?". Wykluczyłem respondentów, którzy wybrali „Inne" (12 procent) oraz „Nie mam ulubionej interpretacji" (12 procent). Nie oddano głosów na pewne interpretacje, których nie omawiałem na łamach tej książki, takie jak interpretacja transakcyjna Johna Cramera.

Być może, jak rozumował sam Odyseusz, lepiej zaryzykować życie kilku członków załogi, żeglując zbyt blisko wybrzeży Scylli, niż utratę całego Statku Nauki w wirze metafizycznego nonsensu, jakim jest Charybda. Jeżeli mamy nauczyć się czegoś nowego, to spekulacje na temat naszego odzwierciedlenia rzeczywistości *muszą* być powiązane z faktami empirycznymi dotyczącymi rzeczy takich, jakimi się wydają. W końcu to właśnie oznacza, że coś jest naukowe. Nie mogę zaakceptować interpretacji opartej na czystej metafizyce, nieważne, jak „oszczędna" mogłaby się wydawać. Jak Dennett, który dowodził, że akceptacja dualizmu kartezjańskiego jest równoznaczna z poddaniem się, ja uważam, że kapitulacją jest też akceptacja wielu światów.

Możliwe jest jeszcze inne wyjście z sytuacji. Jestem całkiem pewien, że mechanika kwantowa to jeszcze nie koniec. Pomimo jej bezprecedensowego sukcesu wiemy, że nie uwzględnia jak należy czasu i przestrzeni. Dlatego właśnie uważam, iż bliższe badanie realistycznie interpretowanej funkcji falowej niekoniecznie jest dobrym sposobem na uzyskanie odpowiedzi, ponieważ niesie ze sobą bagaż w postaci czasu absolutnego i przestrzeni absolutnej. Niestety, nie możemy liczyć na to, że uratują nas podejmowane współcześnie wysiłki zbudowania kwantowej teorii grawitacji, ponieważ wydaje się, że zbyt mocno opierają się na istniejącym formalizmie kwantowym i nie zapewniają skutecznego sposobu na wykroczenie poza jego ramy.

Równie dobrze może być tak, że teoria, która wykracza poza mechanikę kwantową, nadal będzie pełna problemów konceptualnych i zagadek filozoficznych, ale miło byłoby odkryć, że wbrew pozorom rzeczywiście dałoby się tutaj zobaczyć coś więcej.

274 Lee Smolin, *Niedokończona rewolucja Einsteina*…, op. cit., s. 216.

275 Ibidem, s. 318.

276 Maximilian Schlosshauer, Johannes Koer i Anton Zeilinger, *A Snapshot of Foundational Attitudes toward Quantum Mechanics*, arXiv:quant-ph/1301.1069v1, 6 stycznia 2013 roku. Zanim zapytasz – nie, nie brałem w niej udziału. Byłem jednak ogromnie usatysfakcjonowany zaproszeniem mnie do wygłoszenia wykładu na kolejnej konferencji na ten sam temat, zorganizowanej w Traunkirchen w listopadzie 2013 roku, po publikacji mojej książki *Pożegnanie z rzeczywistością*.

DODATEK

Sądy logiczne realistów i aksjomaty mechaniki kwantowej

Sądy logiczne realistów (rozdziały 2 i 3)

Pierwszy Sąd Logiczny Realistów: *Księżyc nadal istnieje, kiedy nikt na niego nie patrzy (ani o nim nie myśli).*
Istnieje coś takiego jak obiektywna rzeczywistość.

Drugi Sąd Logiczny Realistów: *Coś, czym możesz spryskiwać, jest realne.*
Niewidzialne byty, takie jak fotony i elektrony, naprawdę istnieją.

Trzeci Sąd Logiczny Realistów: *Podstawowe pojęcia pojawiające się w teoriach naukowych odzwierciedlają rzeczywiste własności i zachowania rzeczywistych ciał fizycznych.*
W mechanice kwantowej „podstawowym pojęciem" jest funkcja falowa.

Czwarty Sąd Logiczny Realistów: *Teorie naukowe podsuwają nam spostrzeżenia i zapewniają zrozumienie, pozwalając* ***robić*** *rzeczy, których w przeciwnym razie nie rozważalibyśmy lub nie sądzilibyśmy, że są możliwe.*
Jest to „aktywny" sąd logiczny. Kiedy decydujemy, czy teoria jest realistyczna, czy antyrealistyczna, zadajemy sobie pytanie, do podjęcia jakich działań teoria nas zachęca.

Aksjomaty mechaniki kwantowej (rozdział 4)

Aksjomat Pierwszy: *Stan układu kwantowomechanicznego jest w pełni zdefiniowany przez jego funkcję falową.*

Aksjomat ten można rozumieć jako „nie ma tu na co patrzeć". Funkcja falowa zawiera wszystko, co jest nam potrzebne, nie ma więc potrzeby, by szukać skrywającego się pod jej powierzchnią jakiegoś głębszego poziomu rzeczywistości.

Aksjomat Drugi: Obserwable w mechanice kwantowej są odwzorowywane przez określoną klasę operatorów matematycznych.

To aksjomat „odpowiedniego zbioru kluczy". Żeby uzyskać obserwable, takie jak pęd i energia, musimy otworzyć pudełko odwzorowywane przez funkcję falową. Różne obserwable wymagają wyjęcia z odpowiedniego zbioru właściwego klucza.

Aksjomat Trzeci: *Średnia wartość obserwabli dana jest wartością oczekiwaną odpowiadającego jej operatora.*

To aksjomat „otwórz pudełko". Jest to przepis, według którego łączymy operatory z funkcjami falowymi, aby obliczać wartość obserwabli.

Aksjomat Czwarty: *Prawdopodobieństwo, że pomiar zapewni określony wynik, wywodzi się z kwadratu odpowiedniej funkcji falowej.*

To reguła Borna albo inaczej aksjomat: „co możemy otrzymać?". Zastosowanie reguły Borna do superpozycji nie mówi nam, co uzyskamy w następnym pomiarze.

Aksjomat Piąty: *W układzie zamkniętym, niepodlegającym wpływom zewnętrznym, funkcja falowa ewoluuje w czasie zgodnie z zależnym od czasu równaniem Schrödingera.*

To aksjomat „jak stamtąd znalazła się tutaj". Zauważmy, że nie ma tu miejsca na ten rodzaj nieciągłości, który kojarzymy z procesem pomiaru. Jak rozumiał to von Neumann, akceptując ten aksjomat, jesteśmy zmuszeni przyjąć kolejny (lecz powiązany z nim) aksjomat, w którym zakładamy, że funkcja falowa odpowiadająca superpozycji wielu możliwych wyników pomiaru ulega kolapsowi, dając tylko jeden z nich.

PODZIĘKOWANIA

Opuściłem środowisko akademickie wiele lat temu, ale wydaje mi się, że po trzynastu latach wypełnionych studiowaniem, nauczaniem i prowadzeniem badań na pięciu różnych uniwersytetach, rozsianych po całym świecie, pewne nawyki zakorzeniają się mocno i trudno ich się wyzbyć. Gdy tylko mogę, podrzucam specjalistom z uczelni moje teksty do przeczytania, licząc na ich komentarz, który upewni mnie w tym, co robię dobrze, albo naświetli i pozwoli wyeliminować błędy.

W związku z tym po raz kolejny jestem dłużnikiem Carla Rovellego z Uniwersytetu Aix-Marseille za przeczytanie wstępnej wersji rękopisu, zaangażowanie w intensywną wymianę poczty elektronicznej na temat relacyjnej mechaniki kwantowej i wzięcie części odpowiedzialności za podkopanie mojej wiary w realizm Einsteina. Wiele korzyści czerpałem z komentarzy Roberta Griffithsa z Uniwersytetu Carnegie Mellon (na temat spójnych historii), Christophera Fuchsa z Uniwersytetu Massachusetts w Bostonie (na temat QBismu), Massima Pigliucciego z nowojorskiego City College i Micheli Massimi z Uniwersytetu Edynburskiego (na temat filozofii nauki i mojej wielkiej metafory naukowego teoretyzowania), Michaela Cuffaro z Uniwersytetu Western Ontario (na temat problemu preferowanej bazy w interpretacji wieloświatowej), Harveya Browna z Uniwersytetu w Oksfordzie i Davida Wallace'a z Uniwersytetu Południowej Kalifornii (na temat interpretacji Everetta), a także Jamesa Ladymana z Uniwersytetu w Bristolu (na temat naturalizowanej metafizyki). Proszę zrozumieć, że kierowane ku nim wyrazy wdzięczności *nie powinny* prowadzić do wniosku, iż

wszyscy ci dobrzy ludzie zgadzają się lub choćby sympatyzują z tym, co napisałem na wspomniane tematy w niniejszej książce. Wszelkie mylne interpretacje i pomyłki, które pozostały w treści, są wyłącznie moim dziełem.

Oczywiście, nic z tego nie mogłoby się udać bez Lathy Menon, mojej redaktorki o anielskiej cierpliwości, Jenny Nugee, Lucii Perez, Charlesa Laudera i zespołu produkcyjnego z Oxford University Press, argentyńskiej artystki Eugenii Nobati, której dziełem jest piękna wersja mojej metafory naukowego teoretyzowania (rysunek 7) i wielki zadymiony smok Wheelera (rysunek 10), a także mojego syna Tima, który dostarczył piktogramy. Na zawsze pozostanę wdzięczny za ich wysiłki.

Jim Baggott
październik 2019

PODZIĘKOWANIA ZA UDOSTĘPNIENIE ILUSTRACJI

Rysunek 1 Zaczerpnięty z: C. Christiansen, *Lærebog i Physik*, Gyldendal, Kopenhaga 1910.

Rysunek 2 (b) Zaczerpnięty za zgodą z: Veritasium, *L'experience originale en double fente* (2013). YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=Iuv6hY6zsd0.

Rysunek 3 (a) © Cloudylabs/Wikimedia Commons/CC-BY-SA-3.0. Zamieszczony na warunkach Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Licencja https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en. (b) Zaczerpnięty za zgodą z: A. Tonomura i in., *Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*, „American Journal of Physics", nr 57 (2), s. 117–120. Copyright © 1989, AIP Publishing. https://doi.Org/10.1119/1.16104.

Rysunek 4 Zaczerpnięty za zgodą z: A. Tonomura i in., *Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*, „American Journal of Physics", nr 57 (2), s. 117–120. Copyright © 1989, AIP Publishing. https://doi.Org/10.1119/1.16104.

Rysunek 8 Artepics/Alamy Stock Photo.

Rysunek 9 Zaczerpnięty za zgodą z: *Albert Einstein: Philosopher – scientist*, t. I, red. Paul Arthur Schilpp, Open Court Publishing Company, oddział Carus Publishing Company, Chicago IL. Prawa autorskie © 1949 Library of Living Philosophers.

Rysunek 12 Zaczerpnięty za zgodą z: J.S. Bell, *Bertlmann's socks and the nature of reality*, „J. Phys. Colloques", nr 42 (C2): C2–41-C2–62. Copyright © 1981, EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/jphyscol:1981202.

Rysunek 15 Zaadaptowany za zgodą z: C. Philippidis i in., *Quantum interference and the quantum potential*, „Nuovo Cimento", nr 52B, s. 15–28. Copyright © 1979, Società Italiana di Fisica.

Rysunek 16 Zaadaptowany za zgodą z: S. Hameroff, *Quantum computation in brain microtubules? The Penrose–Hameroff 'Orch OR' model of consciousness*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences", nr 356 (1743). http://doi.org/10.1098/rsta.1998.0254.

Rysunek 17 The Picture Art Collection/Alamy Stock Photo.

Symbole

(http://www.onlinewebfonts.com, CC BY 3.0)

(Premiumvectors / Shutterstock.com)

(iStock.com / MrPlumo)

BIBLIOGRAFIA

Oto pewna interesująca kwestia. Jaki jest *cel* bibliografii zamieszczanej w książce popularnonaukowej? Czy chodzi o to, aby upewnić czytelników, iż książka jest efektem starannych i gruntownych przygotowań, została oparta na publikacjach uznanych autorytetów w danej dziedzinie? A może ma stanowić dowód mądrości autora – spójrzcie, co przeczytałem, aby napisać tę książkę?

Podejmując decyzję w sprawie doboru pozycji, jakie miałbym tu zawrzeć, wyobraziłem sobie dociekliwych czytelników, którzy po raz pierwszy zetknęli się z konceptualnymi i filozoficznymi problemami mechaniki kwantowej, a zawarty w tej książce materiał skutecznie zmotywowałby ich do podjęcia dalszych poszukiwań. W rezultacie powstała bibliografia, która byłaby niezwykle użyteczna dla mnie w 1987 roku, gdy desperacko chciałem się dowiedzieć, dlaczego nikt wcześniej mi o tym wszystkim nie powiedział.

LITERATURA POPULARNONAUKOWA

To książki, po które każdy, kto jest zainteresowany, ale nie ma formalnego wykształcenia w zakresie fizyki kwantowej, powinien sięgnąć i które może z radością przeczytać. Zawarłem tu głównie niedawne publikacje, lecz są też starsze rarytasy, po prostu zbyt dobre, aby je pominąć.

Aczel Amir D., *Entanglement: The Greatest Mystery in Physics*, Wiley, Londyn 2003.
Albert David Z., *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1992.
Ananthaswamy Anil, *Through Two Doors at Once: The Elegant Experiment that Captures the Enigma of Our Quantum Reality*, Dutton, Nowy Jork 2018.
Ball Philip, *Beyond Weird: Why Everything You Thought You Knew About Quantum Physics is Different*, The Bodley Head, Londyn 2018.
Baggott Jim, *The Quantum Story: A History in 40 Moments*, Oxford University Press, Oksford 2011.
Baggott Jim, *Pożegnanie z rzeczywistością. Jak współczesna fizyka odchodzi od poszukiwania naukowej prawdy*, przeł. Marek Krośniak, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015.
Baggott Jim, *Przestrzeń kwantowa. Pętlowa grawitacja kwantowa i poszukiwanie struktury przestrzeni, czasu i Wszechświata*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2020.
Barrow John D. i Tipler Frank J., *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oksford 1986.
Baeyer Hans Christian von, *QBism: The Future of Quantum Physics*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2016.
Becker Adam, *What is Real: The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics*, John Murray, Londyn 2018.
Carroll Sean, *Coś głęboko ukrytego: światy kwantowe i emergencja czasoprzestrzeni*, przeł. Urszula i Mariusz Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2020.
Davies P.C.W. i Brown Julian R. (red.), *Duch w atomie: dyskusja o paradoksach teorii kwantowej*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo CiS, Warszawa 1996.
Deutsch David, *Struktura rzeczywistości*, przeł. Jerzy Kowalski-Glikman, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.
Feynman Richard, *Charakter praw fizycznych*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.

Feynman Richard P., *QED: osobliwa teoria światła i materii*, przeł. Helena Białkowska, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.
Gamow George, *Thirty Years That Shook Physics*, Dover, Nowy Jork 1966.
Gell-Mann Murray, *Kwark i jaguar: przygody z prostotą i złożonością*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo CiS, Warszawa 1996.
Greene Brian, *Piękno Wszechświata: superstruny, ukryte wymiary i poszukiwania teorii ostatecznej*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 2018.
Greene Brian, *Struktura kosmosu. Przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości*, przeł. Ewa L. Łokas, Bogumił Bieniok, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005.
Greene Brian, *Ukryta rzeczywistość: w poszukiwaniu wszechświatów równoległych*, przeł. Tomasz Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012.
Gribbin John, *Kotki Schrödingera, czyli poszukiwanie rzeczywistości*, przeł. Jacek Bieroń, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1999.
Kumar Manjit, *Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate About the Nature of Reality,* Icon Books, Londyn 2008.
Lindley David, *Where Does the Weirdness Go?*, Basic Books, Nowy Jork 1996.
Orzel Chad, *How to Teach Quantum Physics to Your Dog*, Oneworld, Londyn 2010.
Penrose Roger, *Droga do rzeczywistości: wyczerpujący przewodnik po prawach rządzących Wszechświatem*, przeł. Jerzy Przystawa, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010.
Penrose Roger, *Moda, wiara i fantazja w nowej fizyce Wszechświata*, przeł. Łukasz Lamża, Tomasz Miller, Copernicus Center Press, Kraków 2020.
Penrose Roger, *Nowy umysł cesarza*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
Penrose Roger, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*, Vintage, Londyn 1995.
Raymer Michael G., *Quantum Physics: What Everyone Needs to Know*®, Oxford University Press, Oksford 2017.

Rae Alastair, *Quantum Physics: Illusion or Reality?*, Cambridge University Press, Cambridge 1986.
Rees Martin, *Tylko sześć liczb*, przeł. Piotr Amsterdamski, CiS, Warszawa 2000.
Rovelli Carlo, *Rzeczywistość nie jest tym, czym się wydaje: droga do grawitacji kwantowej/elementarna struktura rzeczy*, przeł. Michał Czerny, Wydawnictwo JK, Łódź 2017.
Rovelli Carlo, *Siedem krótkich lekcji fizyki*, przeł. Urszula Buczkowska-Marchetti, Oficyna Naukowa, Warszawa 2017.
Rovelli Carlo, *Tajemnica czasu*, przeł. Jeremi K. Ochab, Wydawnictwo JK, Łódź 2019.
Sachs Mendel, *Einstein versus Bohr: The Continuing Controversies in Physics*, Open Court, La Salle, IL, 1988.
Smolin Lee, *Czas odrodzony: od kryzysu w fizyce do przyszłości Wszechświata*, przeł. Tomasz Krzysztoń, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015.
Smolin Lee, *Kłopoty z fizyką: powstanie i rozkwit teorii strun, upadek nauki i co dalej*, przeł. Jerzy Kowalski-Glikman, Prószyński i S-ka, Warszawa 2008.
Smolin Lee, *Niedokończona rewolucja Einsteina: w poszukiwaniu tego, co leży poza granicami teorii kwantowej*, przeł. Urszula i Mariusz Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2021.
Smolin Lee, *Trzy drogi do kwantowej grawitacji*, przeł. Jerzy Kowalski-Glikman, CiS, Warszawa 2001.
Susskind Leonard, *Kosmiczny krajobraz: dalej niż teoria strun*, przeł. Urszula i Mariusz Seweryńscy, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011.
Tegmark Max, *Nasz matematyczny Wszechświat. W poszukiwaniu prawdziwej natury rzeczywistości*, przeł. Bogumił Bieniok, Ewa L. Łokas, Prószyński i S-ka, Warszawa 2015.
Weinberg Steven, *Sen o teorii ostatecznej*, przeł. Piotr Amsterdamski, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1998.
Wilczek Frank, *The Lightness of Being: Big Questions, Real Answers*, Allen Lane, Londyn 2009.

BIOGRAFIE LUDZI NAUKI

Zawsze byłem przekonany, że jeden z najlepszych sposobów na to, aby zrozumieć, jak mechanika kwantowa została rozwinięta do obecnej postaci i dlaczego wciąż jest źródłem konsternacji dla nowych pokoleń studentów oraz odbiorców książek popularnonaukowych, polega na zagłębieniu się w biografie ludzi za to odpowiedzialnych. Szybko odkrywamy, że wszystkie mądre argumenty – jednej czy drugiej strony sporu – zostały już wyartykułowane pod koniec lat dwudziestych XX wieku przez naukowców, którzy naprawdę wiedzieli, o czym mówią. Jednak muszę w tym miejscu uprzedzić, że wiele z tych biografii zawiera dość specjalistyczne szczegóły i wymaga pewnego obycia z mechaniką kwantową.

Bernstein Jeremy, *Quantum Profiles*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1991. Zawiera rys biograficzny Johna Bella i Johna Wheelera.

Bird Kai i Sherwin Martin J., *American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer*, Atlantic Books, Londyn 2008.

Cassidy David C., *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*, W.H. Freeman, Nowy Jork 1992.

Enz Charles P., *No Time to be Brief: A Scientific Biography of Wolfgang Pauli*, Oxford University Press, Oksford 2002.

Farmelo Graham, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*, Faber & Faber, Londyn 2009.

Feynman Richard P., *„Pan raczy żartować, panie Feynman!": przypadki ciekawego człowieka*, przeł. Tomasz Bieroń, Społeczny Instytut Wydawniczy Znak, Kraków 2018.

Gleick James, *Geniusz: życie i nauka Richarda Feynmana*, przeł. Piotr Amsterdamski, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1999.

Goodchild Peter, *J. Robert Oppenheimer*, BBC, Londyn 1980.

Heilbron J.L., *The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck and the Fortunes of German Science*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1996.

Heisenberg, Werner, *Physics and Beyond: Memories of a Life in Science*, George Allen & Unwin, Londyn 1971.
Hoffmann Banesh, *Albert Einstein*, Paladin, St. Albans 1975.
Horgan John, *Last Words of a Quantum Heretic*, „Scientific American", luty 1993, s. 38. W części jest to rys biograficzny Davida Bohma.
Isaacson Walter, *Einstein: jego życie, jego wszechświat*, przeł. Jarosław Skowroński, Wydawnictwo W.A.B., Warszawa 2010.
Klein Martin J., *Paul Ehrenfest: The Making of a Theoretical Physicist*, t. 1, 3 wyd., North-Holland, Amsterdam 1985.
Kragh Helge S., *Dirac: A Scientific Biography*, Cambridge University Press, Cambridge 1990.
Macrae Norman, *John von Neumann: The Scientific Genius Who Pioneered the Modern Computer, Game Theory, Nuclear Deterrence, and Much More*, Pantheon Books, Nowy Jork 1992.
Mehra Jagdish, *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman*, Oxford University Press, Oksford 1994.
Monk Ray, *Inside the Centre: The Life of J. Robert Oppenheimer*, Vintage, Londyn 2013.
Moore Walter, *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge University Press, Cambridge 1989.
Nasar Sylvia, *Piękny umysł*, przeł. Piotr Amsterdamski, Wydawnictwo Albatros Andrzej Kuryłowicz, Warszawa 2003. Biografia matematyka Johna Nasha, zawierająca rys biograficzny Johna von Neumanna.
Pais Abraham, *Czas Nielsa Bohra: w fizyce, filozofii i polityce*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2006.
Pais Abraham, *J. Robert Oppenheimer: A Life*, Oxford University Press, Oxford 2006.
Pais Abraham, *Pan Bóg jest wyrafinowany... Nauka i życie Alberta Einsteina*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.
Peat F. David, *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1997.
Poundstone William, *Prisoner's Dilemma: John von Neumann, Game Theory and the Puzzle of the Bomb*, Random House, Nowy Jork

1992.
Wheeler John Archibald, Ford Kenneth, *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics*, W.W. Norton, Nowy Jork 1998.
Whitaker Andrew, *John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics: Vision and Integrity*, Oxford University Press, Oksford 2016.

TEKSTY ZAAWANSOWANE

Zwłaszcza dla tych, którzy rozważają podjęcie studiów, już studiują, ewentualnie studiowali mechanikę kwantową na uniwersytecie, załączyłem kilka odnoszących się do tematu książek z zakresu filozofii nauki i filozofii mechaniki kwantowej.

Ayer Alfred J., *Language, Truth, and Logic*, Penguin, Londyn 1936.
Baggott Jim, *The Quantum Cookbook: Mathematical Recipes for the Foundations of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, Oksford 2020.
Beller Mara, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*, University of Chicago Press, Chicago 1999.
Bohm David, *Przyczynowość i przypadek w fizyce współczesnej*, przeł. Stanislaw Rouppert, Książka i Wiedza, Warszawa 1961.
Bohm David, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1951.
Bohm David i Hiley Basil J., *The Undivided Universe*, Routledge, Londyn 1993.
Broglie Louis de, *Matter and Light: The New Physics*, przeł. Walter H. Johnston, W.W. Norton, Nowy Jork 1939.
Cartwright Nancy, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, Oksford 1983.
Cushing James T., *Philosophical Concepts in Physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1998.
Cushing James T., *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, University of Chicago Press, Chicago 1994.

d'Espagnat Bernard, *Reality and the Physicist: Knowledge, Duration and the Quantum World*, Cambridge University Press, Cambridge 1989.
d'Espagnat Bernard, *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, wyd. 2, Addison-Wesley, Nowy Jork 1989.
Dirac Paul A.M., *The Principles of Quantum Mechanics*, wyd. 4, Clarendon Press, Oksford 1958.
Duhem Pierre, *The Aim and Structure of Physical Theory*, przeł. Philip P. Wiener, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1954.
Feyerabend Paul, *Farewell to Reason*, Verso, Londyn 1987.
Feyerabend Paul, *Przeciw metodzie*, przeł. Stefan Wiertlewski, Siedmiorόg, Wrocław 1996.
Feynman Richard P., Leighton Robert B. i Sands Matthew, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. 3, wyd. 3, przeł. Andrzej Pindor i in., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
Fine Arthur, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, wyd. 2, University of Chicago Press, Chicago 1986.
Fraassen Bas C. van, *The Scientific Image*, Oxford University Press, Oksford 1980.
Gardner Sebastian, *Kant and the Critique of Pure Reason*, Routledge, Londyn 1999.
Gillies Donald, *Philosophy of Science in the Twentieth Century*, Blackwell, Oksford 1993.
Griffiths David J., *Introduction to Quantum Mechanics*, wyd. 2, Cambridge University Press, Cambridge 2017.
Hacking Ian, *Representing and Intervening*, Cambridge University Press, Cambridge 1983.
Heisenberg Werner, *Fizyka a filozofia*, przeł. Stefan Amsterdamski, Książka i Wiedza, Warszawa 1965.
Heisenberg Werner, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover, Nowy Jork 1930.
Holland Peter R., *The Quantum Theory of Motion: An Account of the De Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.
Isham Chris J., *Lectures on Quantum Theory*, Imperial College Press, Londyn 1995.

Jammer Max, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, Nowy Jork 1974.
Kragh Helge, *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure 1913–1925*, Oxford University Press, Oksford 2012.
Kragh Helge, *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
Kragh Helge, *Wielkie spekulacje: teorie i nieudane rewolucje w fizyce i kosmologii*, przeł. Tomasz Lanczewski, Copernicus Center Press, Kraków 2016.
Kuhn Thomas S., *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity 1894–1912*, University of Chicago Press, Chicago 1978.
Kuhn Thomas S., *Struktura rewolucji naukowych*, przeł. Helena Ostromęcka, Wydawnictwo Aletheia, Warszawa 2009.
Ladyman James, Ross Don, Spurrett David i Collier John, *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford University Press, Oksford 2007.
Lakatos Imre i Musgrave Alan (red.), *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge University Press, Cambridge 1970.
Lockwood Michael, *Mind, Brain and the Quantum. The Compound 'I'*, Blackwell, Oksford 1990.
Mehra Jagdish, *Einstein, Physics and Reality*, World Scientific, Londyn 1999.
Murdoch Dugald, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
Neumann John von, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1955.
Omnès Roland, *Quantum Philosophy*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
Omnès Roland, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994.
Omnès Roland, *Understanding Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
Popper Karl, *Droga do wiedzy: domysły i refutacje*, przeł. Stefan Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.

Popper Karl R., *Logika odkrycia naukowego*, przeł. Urszula Niklas, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
Popper Karl R., *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Unwin Hyman, Londyn 1982.
Preston John, *Kuhn's The Structure of Scientific Revolutions: A Reader's Guide*, Continuum, Londyn 2008.
Psillos Stathis, *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, Routledge, Londyn 1999.
Rae Alastair I.M., *Quantum Mechanics*, wyd. 2, Adam Hilger, Bristol 1986.
Russell Bertrand, *Zagadnienia filozofii*, przeł. Ludwik Silberstein, De Agostini, Warszawa 2002.
Ryle Gilbert, *Czym jest umysł?*, przeł. Witold Marciszewski, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970.
Saunders Simon, Barrett Jonathan, Kent Adrian i Wallace David (red.), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality*, Oxford University Press, Oksford 2010.
Schacht Richard, *Classical Modern Philosophers: Descartes to Kant*, Routledge & Kegan Paul, Londyn 1984.
Wallace David, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*, Oxford University Press, Oksford 2012.

ANTOLOGIE I ZBIORY

Tam, gdzie było to konieczne, odniesienia do „pierwotnej" literatury naukowej – rozumianej jako oryginalne sprawozdania z badań i artykuły przeglądowe – umieściłem w przypisach dolnych. Jednak część najważniejszych artykułów w historii i filozofii mechaniki kwantowej została zebrana i opublikowana w formie książkowej, dzięki czemu zyskały one przyjemną postać, łatwo dostępną dla zainteresowanych czytelników, którzy nie mają możliwości skorzystania z uniwersyteckich bibliotek. Oto wybór najlepszych z takich publikacji.

Bell John S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
Born Max, *Physics in My Generation*, wyd. 2, Springer, Nowy Jork 1969.
DeWitt Bryce S. i Graham Neill (red.), *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Pergamon, Oksford 1975.
French Anthony P. i Kennedy P.J. (red.), *Niels Bohr: A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1985. Książka zawiera rozdział autorstwa N. Davida Mermina, *A Bolt from the Blue: The E-P-R Paradox*, który w 1987 roku rozbudził moje zainteresowanie.
Hawking, Stephen (red.), *The Dreams that Stuff Is Made Of: The Most Astounding Papers on Quantum Physics and How They Shook the World*, Running Press, Filadelfia 2011.
Heisenberg Werner, *Encounters with Einstein*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983.
Hiley Basil J. i Peat F. David (red.), *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm*, Routledge & Kegan Paul, Londyn 1987.
Kilmister C.W. (red.), *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath*, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
Oppenheimer J. Robert, *Atom and Void*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1989.
Schilpp Paul A. (red.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (The Library of Living Philosophers), Open Court, La Salle, IL, 1949. Książka zawiera rozdział autorstwa Bohra, omawiający słynny spór na temat odzwierciedlania kwantowej rzeczywistości.
Stachel John (red.), *Einstein's Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2005.
van der Waerden Bartel Leendert, *Sources of Quantum Mechanics*, Dover, Nowy Jork 1968.
Wheeler John Archibald, *At Home in the Universe*, AIP Press, Nowy Jork 1994.
Wheeler John Archibald i Żurek Wojciech Hubert (red.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983.

Spis treści

PRZEDMOWA
PROLOG
CZĘŚĆ PIERWSZA. REGUŁY GRY
- ROZDZIAŁ 1. Kompletny przewodnik po mechanice kwantowej
- ROZDZIAŁ 2. A tak w ogóle czym jest to, co nazywamy „rzeczywistością”?
- ROZDZIAŁ 3. Żeglując po morzu odwzorowania
- ROZDZIAŁ 4. Gdy Einstein schodził na śniadanie

CZĘŚĆ DRUGA. ROZGRYWKA
- ROZDZIAŁ 5. To zamknij się i licz
- ROZDZIAŁ 6. Ale musimy ją ponownie zinterpretować
- ROZDZIAŁ 7. Trzeba więc coś dodać
- ROZDZIAŁ 8. Musimy więc dodać do niej coś jeszcze innego
- ROZDZIAŁ 9. Ponieważ musimy włączyć mój umysł
- ROZDZIAŁ 10. Ponieważ... dobrze, poddaję się!

EPILOG
DODATEK
PODZIĘKOWANIA
PODZIĘKOWANIA ZA UDOSTĘPNIENIE ILUSTRACJI